

**Entwicklung eines Simulationsmodells
zur Bewertung der Betriebsqualität-
Key Performance Indicators aus Sicht der Reisenden**

Roman Hauck

(Matrikelnummer: 70129348)

Eingereichte Abschlussarbeit

zur Erlangung des Grades

Bachelor of Science

im Studiengang

Management des öffentlichen Verkehrs

an der

Karl-Scharfenberg-Fakultät

der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaft

Erster Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Christoph J. Menzel

Zweiter Prüfer: Dipl.-Wirtsch.-Ing. (FH) Benedikt Scheier M.Sc.

Eingereicht am: 20.07.2018

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	II
Abkürzungsverzeichnis.....	III
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	VI
1 Thematik und Relevanz	1
1.1 Überblick Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt	1
1.2 Relevanz der Arbeit	2
1.3 Aufgabenstellung und Zielsetzung.....	4
1.4 Vorgehensweise	6
2 Definition „Betriebsqualität“ und „Eisenbahnbetriebssimulation“	7
2.1 Betriebsqualität.....	7
2.1.1 Betriebsqualität aus der Sicht der Infrastrukturunternehmen	7
2.1.2 Betriebsqualität aus der Sicht der Betreiber.....	9
2.1.3 Betriebsqualität aus der Sicht der Reisenden	11
2.2 Eisenbahnbetriebssimulation.....	13
2.2.1 Begriffsdefinition	13
2.2.2 Simulationsverfahren	13
2.2.3 Simulationsmodelle.....	15
2.2.4 Simulation of Urban MObility (SUMO)	17
3 Modellierung der Simulationsumgebung	18
3.1 Infrastruktur	18
3.2 Fahrplan	22
3.2.1 Liniengebundener Taktfahrplan	22
3.2.2 Integraler Taktfahrplan.....	23
3.2.3 Simulationsgebundene Fahrplandaten	25

3.3	Reiseketten	26
3.4	Verspätungsarten im Eisenbahnverkehr.....	30
3.5	Störungsszenarien.....	32
3.6	Key Performance Indicators	34
4	Simulation und Auswertung	36
4.1	Szenario „Nullfall“	36
4.2	Störungsszenario „Erhöhtes Reiseaufkommen“	39
4.3	Störungsszenario „Fahrzeuge“	41
4.4	Störungsszenario „Schienensuizid“	43
4.5	Störungsszenario „Baustellen und Gleise“	45
4.6	Erkenntnisse aus den Simulationen	47
5	SUMO und die geplante Weiterentwicklung.....	49
5.1	Stand heute	49
5.2	Probleme während der Simulation.....	51
5.3	Weiterentwicklung von SUMO	53
6	Zusammenfassung, Fazit und Ausblick.....	54
7	Literaturverzeichnis	56
	Eidesstaatliche Erklärung	60

Vorwort

Diese Bachelorarbeit bildet den Abschluss des Studiums im Studiengang „Management des öffentlichen Verkehrs“ an der Karl-Scharfenberg-Fakultät der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaft. Zusammen mit dem Praxissemester bildet sie den Abschluss eines Vollzeitstudiums zur Erlangung des Titels „Bachelor of Science“.

Die Idee für das Thema ist während der Praxisphase an dem Institut für Verkehrssystemtechnik im Deutschen Luft- und Raumfahrtzentrum entstanden und ist Teil des DLR-Projekts „Next Generation Railway System III“. Die Betreuung der Bachelorarbeit am DLR erfolgt durch Dipl.-Wirtsch.-Ing Benedikt Scheier M.Sc. (Zweitprüfer). Die Funktion als Erstprüfer übernimmt Prof. Dr.-Ing. Christoph J. Menzel der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaft. Beide standen mir stets mit Hinweisen und Ratschlägen zur Seite. An dieser Stelle möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Christoph J. Menzel und Benedikt Scheier bedanken.

Während der Abschlussarbeit durfte ich zudem auf die Unterstützung von verschiedenen Fachleuten zurückgreifen. Namentlich zu erwähnen sind hier insbesondere folgende Personen, bei denen ich mich ebenfalls recht herzlich bedanken möchte:

- Pablo Alvarez Lopez, DLR, Institut für Verkehrssystemtechnik
- Jakob Erdmann, DLR, Institut für Verkehrssystemtechnik
- Florian Brinkmann, DLR, Institut für Verkehrssystemtechnik
- Svenja Hainz, DLR, Institut für Verkehrssystemtechnik
- Kathrin Karola Viergutz, DLR, Institut für Verkehrssystemtechnik
- Christian Meirich, DLR, Institut für Verkehrssystemtechnik

Abkürzungsverzeichnis

CSS	Customer Satisfaction Surveys
DB	<i>Deutsche Bahn</i>
DIN	<i>Deutsche Industrienorm</i>
DLR	<i>Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt</i>
DPM.....	Direct Performance Measures
EDV	<i>Elektronische Datenverarbeitung</i>
EN	<i>Europäische Norm</i>
EVU	<i>Eisenbahnverkehrsunternehmen</i>
HBEFA.....	<i>Handbook Emission Factors for Road Transport</i>
HGV	<i>Hochgeschwindigkeitsverkehr</i>
ITF	<i>Integraler Taktfahrplan</i>
KPI.....	<i>Key Performance Indicator</i>
MIV	<i>motorisierter Individualverkehr</i>
MSS.....	Mystery Shopping Surveys
ÖPNV	<i>Öffentlicher Personennahverkehr</i>
ÖPV	<i>Öffentlicher Personenverkehr</i>
SFS.....	<i>Schnellfahrstrecke</i>
SUMO.....	<i>Simulation of Urban MObility</i>

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Wirtschaftlich optimaler Bereich nach (DB Netz AG, 2008)	7
Abbildung 2: Qualitätskreis nach (Deutsches Institut für Normung e.V., 2002)	11
Abbildung 3: Makroskopisches Verkehrsmodell	15
Abbildung 4: Mikroskopisches Verkehrsmodell aus (Flamm & Meirich, 2018).....	16
Abbildung 5: Mesoskopisches Verkehrsmodell aus (Flamm & Meirich, 2018).....	16
Abbildung 6: Graffische Benutzeroberfläche SUMO GUI aus (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 2018).....	17
Abbildung 7: Schnellfahrstrecken in Deutschland aus (Wikimedia Foundation Inc., 2018)	18
Abbildung 8: Liniennetzplan SUMO	19
Abbildung 9: Hannover Hauptbahnhof in SUMO in der „standard“ Ansicht	20
Abbildung 10: Bremen Hauptbahnhof in der "real world" Ansicht	21
Abbildung 11: Grundprinzip eines integralen Fahrplans aus (Pachl, 2004)	23
Abbildung 12: Abfahrts-, Umsteige-,Ankunftszeiten	25
Abbildung 13: Reiseauskunft von Frankfurt (Main) nach Berlin aus DB Reiseauskunft	27
Abbildung 14: Fahrten im Störfungsfall von Hannover nach Berlin (ICE 1053 und IC 1914) aus DB Reiseauskunft	27
Abbildung 15: Reiseauskunft von Hannover nach Bremerhaven aus DB Reiseauskunft.....	28
Abbildung 16: Fahrten im Störfungsfall von Bremen nach Bremerhaven (NWB RS2 und RE9) aus DB Reiseauskunft	28
Abbildung 17: Reiseauskunft von Berlin nach Hamburg aus DB Reiseauskunft	29
Abbildung 18: Fahrten im Störfungsfall von Hannover nach Hamburg (ICE 74 und ICE 586) aus DB Reiseauskunft	29
Abbildung 19: Störung "Baustelle und Gleise" definiert als "stop"	33
Abbildung 20: Output der Kennzahlen	35
Abbildung 21:Flowdaten aus dem OSM-Projekt	36
Abbildung 22: Selbstdefinierte Persontrips	37
Abbildung 23: Selbstdefinierte Zugtrips	37

Abbildung 24: Erhöhtes Reiseaufkommen Frankfurter Hauptbahnhof aus (Rippegather, 2018).....	39
Abbildung 25: Defekter Trafo setzt Triebwagen in Brand aus (Wochenblatt, 2017) .	41
Abbildung 26: Schienensuizid aus (news.ch, 2015)	43
Abbildung 27: Bauarbeiten am Gleis aus (Wikimedia Commons, 2017)	45
Abbildung 28: Darstellung der kundenbasierten Verspätungsminuten	47
Abbildung 29: SUMO Workflow nach (Garrido Abenza, Malumbres, Pinol Peral, & Hernandez, 2017)	50
Abbildung 30: Falsch deklarierte Kanten	52

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Qualitätskategorien nach (Deutsches Institut für Normung e.V., 2002)	9
Tabelle 2: Zugfahrten mit Hauptlauf	25
Tabelle 3: Verspätungsarten nach DB Netz AG Richtlinie 405	30
Tabelle 4: Ankunftszeiten Reisekette "Erika Mustermann"	38
Tabelle 5: Ankunftszeiten Reisekette "Max Mustermann"	38
Tabelle 6: Ankunftszeiten Reisekette "Familie Mustermann"	38
Tabelle 7: Ankunftszeiten Reisekette "Erika Mustermann" im Störfungsfall "Erhöhtes Reiseaufkommen"	39
Tabelle 8: Ankunftszeiten Reisekette "Max Mustermann" im Störfungsfall "Erhöhtes Reiseaufkommen"	40
Tabelle 9: Ankunftszeiten Reisekette "Familie Mustermann" im Störfungsfall "Erhöhtes Reiseaufkommen"	40
Tabelle 10: Ankunftszeiten Reisekette "Erika Mustermann" im Störfungsfall "Fahrzeuge"	41
Tabelle 11: Ankunftszeiten Reisekette "Max Mustermann" im Störfungsfall "Fahrzeuge"	42
Tabelle 12: Ankunftszeiten Reisekette "Familie Mustermann" im Störfungsfall "Fahrzeuge"	42
Tabelle 13: Ankunftszeiten Reisekette "Erika Mustermann" im Störfungsfall "Schienensuizid"	43
Tabelle 14: Ankunftszeiten Reisekette "Max Mustermann" im Störfungsfall "Schienensuizid"	44
Tabelle 15: Ankunftszeiten Reisekette "Familie Mustermann" im Störfungsfall "Schienensuizid"	44
Tabelle 16: Ankunftszeiten Reisekette "Erika Mustermann" im Störfungsfall "Baustellen und Gleise"	45
Tabelle 17: Ankunftszeiten Reisekette "Max Mustermann" im Störfungsfall "Baustellen und Gleise"	46
Tabelle 18: Ankunftszeiten Reisekette "Familie Mustermann" im Störfungsfall "Baustellen und Gleise"	46

1 Thematik und Relevanz

1.1 Überblick Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) ist das nationale Forschungszentrum der Bundesrepublik Deutschland, mit dem Hauptsitz in Köln. Neben Köln sind deutschlandweit 19 weitere Standorte vertreten, aber auch international betreibt das DLR Verbindungsbüros in Washington D.C., Tokio, Paris und Brüssel. Circa 8.000 Mitarbeiter/innen werden in 40 verschiedenen Instituten, Test- sowie Betriebseinrichtungen beschäftigt.

Neben Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in den Bereichen Luft- und Raumfahrt, werden weitere Institute in den Bereichen Energie, Verkehr, Digitalisierung und Sicherheit geführt. Die Projekte der einzelnen Institute sind in nationale und internationale Kooperationen eingebunden und dienen sowohl zur „Grundlagenforschung“¹ als auch zur Entwicklung neuer Produkte für die Zukunft. Zur Unterstützung der wissenschaftlichen Arbeit entwerfen und betreiben die Institute Großforschungsanlagen und komplexe Simulationslabore. Außerdem fungiert das DLR auch als Projektträger.

Am Institut für Verkehrssystemtechnik werden an den Standorten Berlin und Braunschweig zukunftsweisende Lösungen für die Verkehrsträger Straße und Schiene erarbeitet. Etwa 170 Wissenschaftler verschiedener Disziplinen (z.B. Ingenieure, Psychologen, Ökonomen und Informatiker arbeiten und konzentrieren sich auf die Forschung und Entwicklung der Mobilität, mit den Schwerpunkten Automotive- und Bahnsysteme, Verkehrs- und Mobilitätsmanagement sowie Intermodalität und öffentlicher Personennahverkehr (ÖPNV). Der Bereich Automotive untersucht das Fahrerverhalten, entwickelt und bewertet neue Assistenzsysteme. Im Bereich Verkehrsmanagement werden Konzepte zu Organisation und Betrieb des Straßenverkehrs erarbeitet. Der Bereich Bahnsysteme erstellt Konzepte für eine sichere und qualitativ hochwertige Betriebsführung sowie für einen wirtschaftlichen Einsatz der Leit- und Sicherungstechnik. Ziel der Arbeiten ist eine „sichere und effiziente Mobilität der Zukunft“².

¹ (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 2018)

² (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 2018)

1.2 Relevanz der Arbeit

„Die Betriebsqualität ist das Ergebnis eines komplexen Zusammenspiels von Infrastruktur, Betriebsprogramm, rollendem Material und der Reise- bzw. Transportkette des Reisenden bzw. zu transportierenden Guts.“³ „Nur wenige Unternehmen unterliegen so vielen Einflussfaktoren und Sicherheitsbestimmungen [...] wie die Bahnunternehmen.“⁴ Darüber hinaus muss die Qualität nach jeder Dienstleistungserbringung für jeden einzelnen Kunden neu erbracht werden. Eine wesentliche Voraussetzung für eine gute Betriebsqualität ist die Stabilität des Fahrplans und seine Fähigkeit, die aus Einbruchs- und Urverspätungen resultierenden Folgeverspätungen zu begrenzen und abzubauen.⁵

Betrachtet man in diesem Hinblick die Betriebsqualität aus der Sicht der einzelnen Eisenbahnunternehmen (Eisenbahninfrastruktur- und Eisenbahnverkehrsunternehmen), werden weitestgehend zugbezogene Verspätungskennzahlen wie zum Beispiel die Ankunftsverspätung eines Zuges an einer Betriebsstelle gemessen. Im Mai 2018 kamen 94,2 Prozent der Züge im Personennahverkehr der DB zur fahrplanmäßigen Ankunftszeit plus maximal 5:59 Minuten an. Im Bereich des Fernverkehrs sind es dabei lediglich 75,8 Prozent.⁶

Diese Kennzahlen fließen wiederum in die Planung und Konstruktion von Fahrplänen ein, um eine möglichst hohe Fahrplanstabilität, Betriebsqualität und Planungsqualität zu erreichen. Eine entscheidende Rolle spielt hier die Größe der Pufferzeiten und der Fahrzeitzuschläge. Erhöht man diese, um die Stabilität möglichst hoch zu halten, wirkt sich dies jedoch negativ auf die Anzahl der Fahrplantrassen (Systemkapazität) und die Beförderungszeit aus. „Ein hochstabiler Fahrplan ist damit nicht automatisch ein kundengerechter Fahrplan“⁷, andererseits führt ein unstabiler Fahrplan zur Unzufriedenheit bei den Kunden.

³ (Scheier & Hainz, 2017, S. 3)

⁴ (König & Töpfer, 2003, S. 9)

⁵ Vgl. (Pachl, 2004, S. 214)

⁶ Vgl. (Deutsche Bahn, 2018)

⁷ (Pachl, 2004, S. 214)

Der Reisende betrachtet die einzelnen Leistungen der Eisenbahnunternehmen als Gesamtsystem. „Der Grund liegt darin, dass der Kunde bei seiner Reisekette [...] nicht nach Anbietern unterscheidet, sondern pünktlich und sicher zu seinem Ziel kommen will.“⁸ Für ihn zählt nur die eigene Verspätung am Zielort, so kann schon eine geringe Zugverspätung am Umsteigebahnhof dazu führen, dass der Anschluss nicht mehr erreicht wird und es zu einem Bruch der Reisekette kommt. Die Folgen sind Unzufriedenheit und ein damit verbundener Imageverlust des Bahnsystems.

Aufgrund der Liberalisierung wird der Wettbewerb unter Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) immer weiter zunehmen. Dabei wird die kundenorientierte Qualität eine zentrale Rolle einnehmen, um sich von Wettbewerbern und/oder der Deutschen Bahn abzuheben. Als Schlussfolgerung müssen die Unternehmen daran arbeiten ein hohes kundenorientiertes Qualitätsniveau anzubieten, um nicht als Folge der Liberalisierung Kunden an Mitstreiter oder den motorisierten Individualverkehr (MIV) zu verlieren.

Angesichts dieser Situation sollen in dem DLR-Projekt „Next Generation Railway System III“ Key Performance Indicators (KPI) definiert und untersucht werden, die eine Bewertung der Betriebsqualität aus der Sicht der Reisenden ermöglichen. Dadurch können Methoden und Konzepte entwickelt werden, um eine Optimierung des Schienenverkehrs zu realisieren und die kundenorientierte Betriebsqualität zu verbessern.

⁸ (König & Töpfer, 2003, S. 10)

1.3 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Die vorliegende Bachelorarbeit hat zur Aufgabe anhand des open Source DLR Simulationsprogramms Simulation of Urban MObility (SUMO) eine Simulationsumgebung zu schaffen, mit der die verschiedenen Key Performance Indicators hinsichtlich ihrer Tauglichkeit zur Bewertung der Betriebsqualität untersucht werden können.

Kapitel 1: Als Einstieg in die Bachelorarbeit gibt dieses Kapitel einen kurzen Überblick über das Deutsche Luft- und Raumfahrtzentrum sowie die Thematik, Relevanz, Aufgabenstellung der Bachelorarbeit sowie die Vorgehensweise bei der Erstellung.

Kapitel 2: Hier werden theoretische Grundlagen der Betriebsqualitäten sowie der Eisenbahnbetriebssimulation definiert und erläutert.

Kapitel 3: Das Kapitel 3 betrachtet die geschaffene Simulationsumgebung, die untersucht werden soll. Neben den grundsätzlichen Definitionen werden hier die zur Simulation verwendeten Daten (Netzplan, Fahrplan, Reiseketten, Verspätungsarten, Störungsszenarien, Key Performance Indicators) beschrieben.

Kapitel 4: In diesem Kapitel geht es rein um den Ablauf und die Auswertung der durchgeführten Simulationen.

Kapitel 5: Dieses Kapitel beschreibt das Fazit der Ergebnisauswertung und gibt eine Empfehlung für weiterführende Untersuchungen.

Kapitel 6: In diesem Kapitel wird der aktuelle Stand der Simulationssoftware SUMO beschrieben, welche Probleme noch vorhanden sind inkl. Empfehlungen zur Lösung der Probleme und wie die Software in naher Zukunft aussehen kann.

Kapitel 7: Dieses Kapitel stellt eine Kurzform der gesamten Arbeit dar, die einen Überblick über die Arbeit in wenigen Minuten ermöglicht. Dazu werden die Relevanz, das Ziel, die Untersuchungen sowie das Ergebnis der Arbeit zusammengefasst.

Ziel ist es geeignete KPI zur Bewertung der Betriebsqualität aus Sicht der Reisenden zu untersuchen. Hierfür werden KPI der Betriebsqualität bei Eisenbahnen recherchiert und voneinander abgegrenzt. Auf Grundlage dieser Abgrenzung, werden gemeinsam mit dem DLR die KPI ausgewählt, die im weiteren Verlauf der Arbeit untersucht werden sollen.

Anhand von durchgeführten Eisenbahnbetriebssimulationen (mit und ohne Störungsszenarien) können Rückschlüsse gezogen werden, um die wesentliche Frage zu beantworten. Hat die Bewertung der Betriebsqualität aus Sicht der Reisenden mittels der Kennzahlen Auswirkungen auf die Fahrplankonstruktion und/oder Disposition im Störfall (Anschlusssicherheit)? Und wenn ja, welche?

Die durchgeführten Simulationen und deren Ergebnisse werden als Fazit und Ausblick zusammengefasst und für das DLR-Projekt Next Generation Railway System III verwendet.

1.4 Vorgehensweise

Für die Bachelorarbeit sind folgende Schritte zu leisten:

- **Literaturrecherche zur Betriebsqualität und Eisenbahnbetriebssimulation**
Theoretische Grundlagen der Betriebsqualität und der Eisenbahnbetriebssimulation werden recherchiert und erläutert.
- **Auswahl und Modellierung eines Teilnetzes in SUMO**
Gemeinsam mit dem DLR wird ein geeignetes Netz ausgewählt und modelliert.
- **Modellierung eines Fahrplans**
Fahrplandaten werden definiert und der Simulationsumgebung beigelegt.
- **Modellierung von Reiseketten**
Reiseketten (Quelle-Ziel) werden für die zu untersuchenden Szenarien definiert und erstellt.
- **Definition und Implementierung von Störungsszenarien**
Störungsszenarien werden ausgearbeitet und als Wartezeiten/Verspätungen implementiert.
- **Durchführung der Simulationsszenarien**
Verschiedene Szenarien werden simuliert und miteinander verglichen.
- **Auswertung der Simulationsszenarien**
KPI werden im Output gespeichert, miteinander verglichen und ausgewertet.
- **Darstellung der Ergebnisse**
Beobachtungen, Ergebnisse und Erkenntnisse werden formuliert.
- **Bewertung der Eisenbahnbetriebssimulation mittels SUMO**
Erfahrungen, Probleme und die Weiterentwicklungen von SUMO werden dargestellt.
- **Darstellung der Bachelorarbeit als Zusammenfassung**
Die Ziele, Untersuchungen, Ergebnisse, das Fazit und der Ausblick werden zusammengefasst.

2 Definition „Betriebsqualität“ und „Eisenbahnbetriebssimulation“

2.1 Betriebsqualität

Im System Eisenbahn ist die Betriebsqualität aus Sicht der Infrastrukturbetreiber und der Verkehrsunternehmen unterschiedlich. Die unterschiedlichen Sichten und Definitionen werden in folgenden Abschnitten behandelt.

2.1.1 Betriebsqualität aus der Sicht der Infrastrukturunternehmen

Die Bemessung und optimale Nutzung der Infrastruktur liegt in der Verantwortung des Bundes und der DB Netz AG. Während der Bund als Eigentümer der Infrastruktur für den Kapazitätsausbau und die Regulierung des Netzzugangs zuständig ist, hat die DB Netz AG als Betreiber die Verantwortung für die Instandhaltung und eine optimale Betriebsqualität. Letzteres hängt von der Fahrwegkapazität und deren Auslastung (Anzahl von Zügen, welche im System auf die Bedienung warten) ab. Als Maßstab für die Ermittlung einer optimalen Zuganzahl dienen Wartezeiten/Verspätungen der Züge innerhalb einer Strecke. Eine Einstufung der Betriebsqualität in Abhängigkeit der Wartezeiten/ Verspätungen und der Anzahl an Zügen innerhalb einer Strecke beschreibt die folgende Abbildung 1).

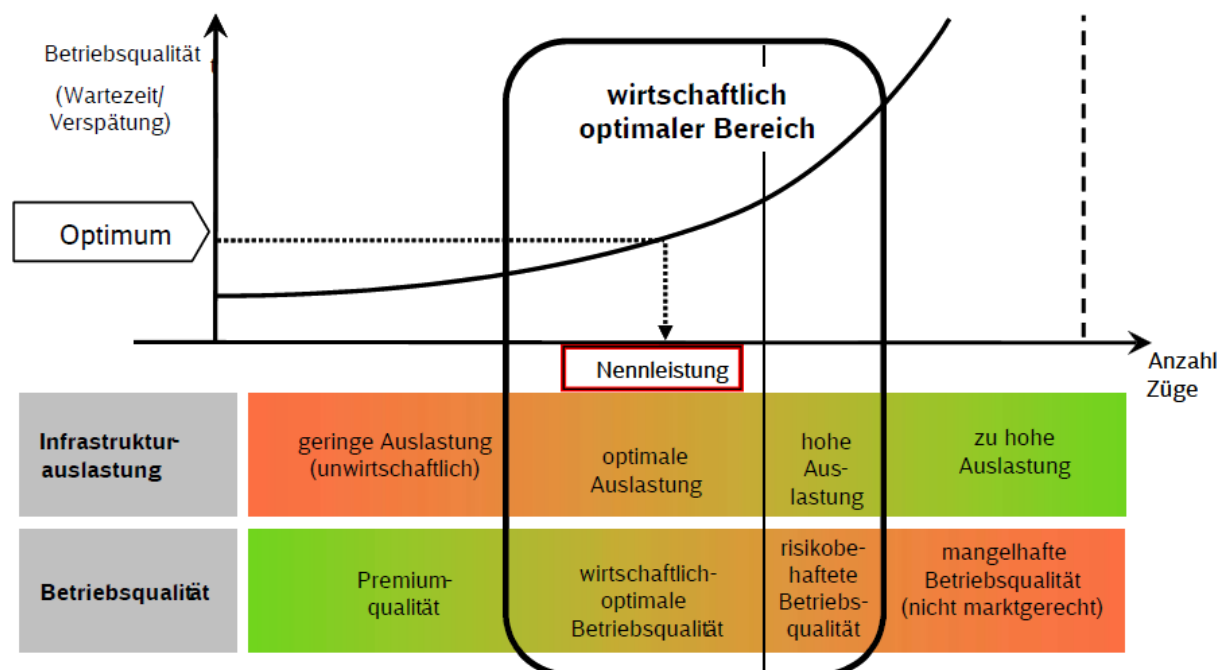


Abbildung 1: Wirtschaftlich optimaler Bereich nach (DB Netz AG, 2008)

Je höher die Auslastung, desto eher kommt es zu einer Entstehung von Wartezeiten. Bei der maximal möglichen Anzahl an Zügen, ergibt sich im Betrieb eine unendliche Wartezeit oder eine unendliche Verspätung der Züge. Dieser Wert wird als theoretische Kapazität bezeichnet und spielt für die praktische Anwendung keine Relevanz.⁹

Mit Hilfe der optimalen Zuganzahl kann eine optimale Auslastung und somit eine wirtschaftlich optimale Betriebsqualität ermittelt werden, aber auch umgekehrt lässt sich durch eine bereits vordefinierte Qualitätsstufe die optimale Zuganzahl errechnen. Der wirtschaftlich optimale Leistungsbereich ist in der Richtlinie 405 „Fahrwegkapazität“ der DB Netz AG definiert (vgl. Abbildung 1: Wirtschaftlich optimaler Bereich). Wie in der Darstellung zu sehen ist, zählen ausschließlich die Bereiche „optimal“ und „risikobehaftet“ zu der wirtschaftlich optimalen Betriebsqualität. Die Bereiche „premium“ und „mangelhaft“ sind wiederum ungeeignet, da die Auslastung der Infrastruktur entweder zu gering oder zu hoch ist.

⁹ Vgl. (Meirich, 2017, S. 27)

2.1.2 Betriebsqualität aus der Sicht der Betreiber

„Die Betriebsqualität [...] ist die im laufenden Betrieb festgestellte Qualität des Betriebsablaufs.“¹⁰ Diese hängt stark von der Stabilität des Fahrplans ab (siehe Kapitel 1.2). Aber auch die vom Auftraggeber in der Ausschreibung festgelegten Quantitäts- und Qualitätskriterien spielen eine wichtige Rolle. „Diese sind nach § 8 Ziffer 1 Absatz 1 VOL/A bei der Ausschreibung eindeutig und erschöpfend zu beschreiben.“¹¹ Qualitätskriterien werden gemäß der DIN EN 13816 in acht Kategorien eingeteilt: Verfügbarkeit, Zugänglichkeit, Information, Zeit, Kundenbetreuung, Komfort, Sicherheit und Umwelteinflüsse. „Diese Europäische Norm legt Anforderungen für die Definition, die Festlegung von Zielen und die Messung der Qualität von Leistungen im öffentlichen Personenverkehr (ÖPV) fest und beinhaltet Vorschläge für die Auswahl entsprechender Messmethoden.“¹² In der folgenden Tabelle 1) werden die acht Qualitätskategorien genauer beschrieben und erläutert.

Tabelle 1: Qualitätskategorien nach (Deutsches Institut für Normung e.V., 2002)

Kategorie	Beschreibung
1. Verfügbarkeit	Umfang der angebotenen Dienstleistung in Hinblick auf Raum, Zeit, Häufigkeit und Verkehrsmittel
2. Zugänglichkeit	Zugang zum ÖPV-System, einschließlich Schnittstellen zu anderen Verkehrsmitteln
3. Information	Systematische Bereitstellung von Informationen über ein ÖPV-System, die Planung und Durchführung einer Reise erleichtern
4. Zeit	Zeitaspekte, die für die Planung und Durchführung einer Reise von Bedeutung sind
5. Kundenbetreuung	Serviceelemente, um eine möglichst genaue Übereinstimmung zwischen der Dienstleistung und der Anforderung der Kunden zu erzielen
6. Komfort	Serviceelemente, um Fahrten mit dem ÖPV erholsam und angenehm zu machen
7. Sicherheit	Der vom Kunden erfahrene Eindruck persönlicher Sicherheit, aus den getroffenen Sicherheitsvorkehrungen und aus den Maßnahmen zur Wahrnehmung
8. Umwelteinflüsse	Auswirkungen auf die Umwelt, die sich durch die Bereitstellung von ÖPV-Leistungen ergeben

¹⁰ (Pachl, 2004, S. 214)

¹¹ Vgl. (Verband Deutscher Verkehrsunternehmen, 2001, S. 3)

¹² (Deutsches Institut für Normung e.V., 2002, S. 5)

Während Kategorie 1 und 2 das ÖPV-Angebot im Allgemeinen beschreiben, liefern die restlichen Kategorien eine genauere Beschreibung der Dienstleistungsqualität sowie den Einfluss der Umwelt auf die Gemeinschaft. Anhand der Kriterien können Verkehrsunternehmen ihre Leistungsfähigkeit messen, überprüfen und gegebenenfalls verbessern.¹³ Dafür zuständig ist das Qualitätsmanagement, welches laut DIN EN 13816 eingeführt werden muss.

Folgenden Schritte müssen durchgeführt werden, um die Anforderungen für eine optimale Betriebsqualität einzuhalten, sowie vorhandene Mängel durch geeignete Korrekturmaßnahmen beseitigt werden.

1. Identifikation der Erwartungen der Kunden in Bezug auf die Qualität
2. Berücksichtigung rechtlicher, politischer, finanzieller, technischer und anderer Sachzwänge
3. Ermittlung bestehender Mängel
4. Zielsetzung unter angemessener Berücksichtigung der Anforderungen und Kriterien
5. Messung der erbrachten Leistung anhand ausgewählter Messmethoden
6. Ergreifung von Korrekturmaßnahmen und Verbesserungen
7. Beurteilung der Wahrnehmung der erbrachten Leistung durch den Kunden
8. Vorbereitung und Durchführung von Aktionsplänen, um mögliche Unterschiede zu verringern

Um sicherzustellen, dass die Dienstleistungsqualität nicht nur aus der Sicht der EVU, sondern auch aus der Sicht der Fahrgäste optimal ist, darf nicht nur die eigene Leistung gemessen und bewertet werden. Anhand der Erwartung sowie der Wahrnehmung der Kunden gegenüber der Dienstleistungsqualität müssen auch Messungen zur Zufriedenheit durchgeführt werden. Wichtige Messmethoden werden im Anhang C der DIN EN 13816 aufgelistet. Dazu gehören insbesondere Umfragen zur Kundenzufriedenheit (en: Customer Satisfaction Surveys – CSS), die Beurteilung der Leistung durch Testkunden sowie eine unmittelbare Leistungsmessung durch den Betrieb (en: Mystery Shopping Surveys – MSS und Direct Performance Measures – DPM).¹⁴

¹³ Vgl. (Verband Deutscher Verkehrsunternehmen, 2001, S. 11)

¹⁴ Vgl. (Deutsches Institut für Normung e.V., 2002, S. 21)

2.1.3 Betriebsqualität aus der Sicht der Reisenden

Die Betriebsqualität aus der Sicht der Reisenden hängt zum einen von der erwarteten und zum anderen von der wahrgenommenen Dienstleistungsqualität ab. Die Abweichung zwischen den beiden Qualitätsstufen kann als Grad der Kundenzufriedenheit betrachtet werden.¹⁵ Die wahrgenommene Qualität wird durch persönliche oder berichtete Erfahrungen beeinflusst und hat teilweise wenige Gemeinsamkeiten mit der tatsächlich erbrachten Dienstleistungsqualität. Messungen zur Wahrnehmung der erbrachten Leistung können anhand von Kundenbefragungen nach dem Prinzip des Qualitätskreises durchgeführt werden. Die folgende Abbildung 2) zeigt einen Qualitätskreis für Dienstleistungen, auf dem die DIN EN 13816 beruht.

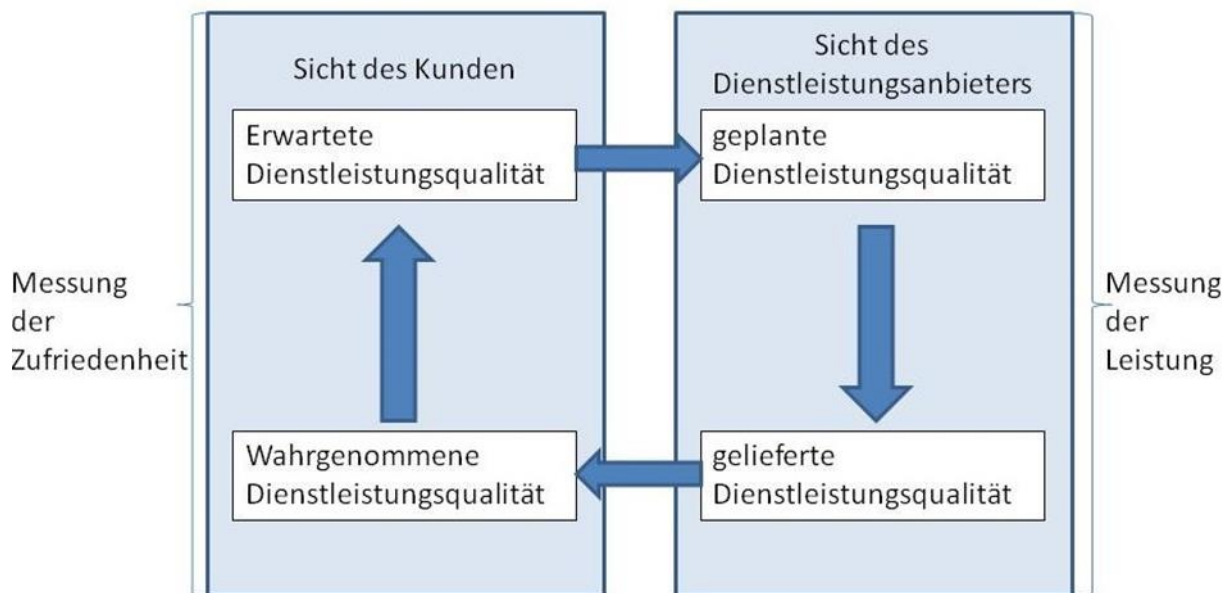


Abbildung 2: Qualitätskreis nach (Deutsches Institut für Normung e.V., 2002)

¹⁵ Vgl. (Deutsches Institut für Normung e.V., 2002, S. 8)

Da der Reisende nicht nach Anbietern unterscheidet, sondern alle Bahnleistungen als Gesamtsystem sieht, steht für ihn die Pünktlichkeit und Sicherheit an oberster Stelle.¹⁶ Weder eine gute Service- oder Kontaktqualität kann eine Verspätung oder einen Ausfall und somit die Zufriedenheit der Reisenden zum positiven wenden. Allein durch eine hohe Pünktlichkeit und damit verbundene Anschlusssicherheit, wird der Reisende sagen: „In der Regel funktioniert [das System, R.H.].“¹⁷ Daher wird in dieser Arbeit der Fokus auf die Anschlusssicherheit und Pünktlichkeit bzw. Verspätung von Zügen und Reisenden gelegt.

¹⁶ Vgl. (König & Töpfer, 2003, S. 10)

¹⁷ (Bohle, 2018)

2.2 Eisenbahnbetriebssimulation

2.2.1 Begriffsdefinition

Der Begriff Simulation von lat. „simulare“, welches übersetzt „nachbilden“, „abbilden“ bedeutet, beschreibt eine Nachbildung eines realen System, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf das reale System übertragbar sind. Mit Verkehrssimulationen können komplexe Forschungsfragen beantwortet und bewertet oder verschiedene Verkehrsmanagementstrategien getestet werden. Netzwerkdaten wie z.B. Straßen bilden zusammen mit der Verkehrsinfrastruktur z.B. Ampeln und der Verkehrsnachfrage unterschiedliche Simulationsszenarien. Die Modellierung durch softwaregestützte Simulationsverfahren ist schnell, gefahrlos und relativ kostengünstig.

2.2.2 Simulationsverfahren

Anhand verschiedener Simulationsverfahren kann der Eisenbahnbetrieb mittels elektronischer Datenverarbeitung (EDV) abgebildet werden, um Aussagen über die Betriebsqualität treffen zu können. Simulationen ermöglichen geplante Änderungen im Bereich der Fahrplankonstruktion oder der Betriebsdurchführung zu testen oder während der Laufzeit zu optimieren. Diese Verfahren erfordern nicht nur Kenntnisse über das Simulationsprogramm, sondern auch fachliche Kenntnisse des untersuchten Betriebsprogramms z.B. den Bahnbetrieb, um durch geeignete Strategien eine Bewertung erzielen zu können.

Charakteristische Simulationsstrategien sind:

- Messung von Verspätungen innerhalb eines Teilnetzes, um Aussagen über diese Strecke oder das Netz zu gewinnen.¹⁸
- Darstellung von Verspätungen innerhalb eines Teilnetzes, um Problemstellen zu lokalisieren.¹⁹

¹⁸ Vgl. (Pachl, 2004, S. 155)

¹⁹ Vgl. (Pachl, 2004, S. 155)

Durch Simulationsverfahren lässt sich sowohl die Fahrplanerstellung als auch die Betriebsdurchführung untersuchen. Hierbei lassen sich die bisherigen Verfahren in zwei Klassen kategorisieren.

- **Asynchrone Simulationsmodelle:**

Die asynchrone Simulation ist eine statische Abbildung der Fahrplanerstellung und der Betriebsdurchführung. Bei der Fahrplanerstellung wird die Nachfrage der Fahrtwünsche in Fahrplantrassen umgesetzt, dabei werden die Züge „in der Reihenfolge der Priorität der Zuggattungen nacheinander (daher die Bezeichnung „asynchron“) in einen Fahrplan gelegt.“²⁰ Zur weiteren Untersuchung der Betriebsdurchführung werden in den zuvor ermittelten Fahrplan asynchrone Einbruchsverspätungen integriert, sodass eine gestörte Fahrplankonstruktion entsteht. Durch verschieben der Sperrzeitentreppen können Problemstellen, an denen es zu Folgeverspätungen kommt, lokalisiert werden. Da die Sperrzeitentreppen jedoch nur verschoben und nicht „verbogen“ werden können, bildet die asynchrone Simulation ein unrealistisches Bild des Betriebs ab. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass eine asynchrone Simulation besonders zur Untersuchung von Fahrplanstudien unter verschiedenen Randbedingungen geeignet ist.

- **Synchrone Simulationsmodelle:**

Bei der synchronen Simulation kann hingegen nur die Betriebsdurchführung abgebildet werden. Im Gegensatz zur asynchronen Simulation wird der Betrieb durch eine „Nachbildung der zeitsynchron ablaufenden Prozesse“²¹ modelliert, wodurch eine realistische Abbildung des Betriebsprogramms erreicht wird. Eine getrennte Untersuchung der Fahrplanerstellung und Betriebsdurchführung ist nur bei der Verwendung eines vorab konstruierten Fahrplans möglich. Die synchrone Simulation eignet sich besonders gut für eine realistische Abbildung des Betriebsablaufs zur Leistungsuntersuchung im Sinne der Stabilität eines abgebildeten Fahrplans.

²⁰ (Pachl, 2004, S. 155)

²¹ (Pachl, 2004, S. 156)

2.2.3 Simulationsmodelle

In der Simulation gibt es drei Modellierungstiefen, die sich im Detaillierungsgrad des Betrachtungsraumes und der Menge an Daten unterscheiden:

- **Makroskopische Ebene:**

Makroskopische Modelle sind vereinfachte Abbildungen von Zugfahrten ohne detaillierte Angaben über die Infrastruktur oder den Fahrplan. Anstelle der einzelnen Betrachtung wird das mittlere Verhalten von Zuggruppen dargestellt.

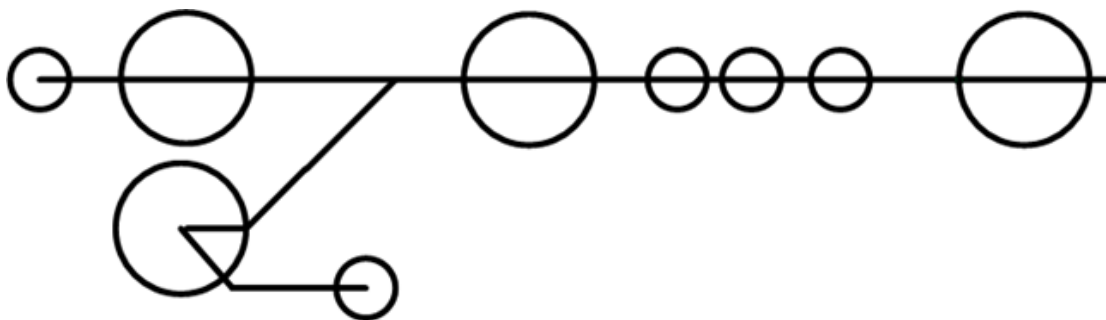


Abbildung 3: Makroskopisches Verkehrsmodell

- **Mikroskopische Verkehrssimulation:**

Während die makroskopische Ebene bei Fragestellungen und Konfliktlösungen für größere Netze in Betracht gezogen wird, dient die mikroskopische Ebene für die Simulation von Teilnetzen oder Streckenabschnitten. „Die Grundlage für die mikroskopische Simulation bilden die mikroskopischen Daten der Infrastruktur und der Züge.“²² Neben der betrachteten Strecke und den Knotenpunkten, werden insbesondere auch die Standorte von Weichenanlagen, Signalanlagen und Haltepositionen für eine mikroskopische Darstellung benötigt. Aber auch fahrzeugspezifische Daten und deren Verspätungseigenschaften sind für den notwendigen Zeitbedarf einer ausgewählten Strecke einzuholen. Durch mikroskopische Simulationen lassen sich die Störungen, die zu Verspätungen führen, im System auffinden und untersuchen.

²² (Schneider, 2016, S. 40)

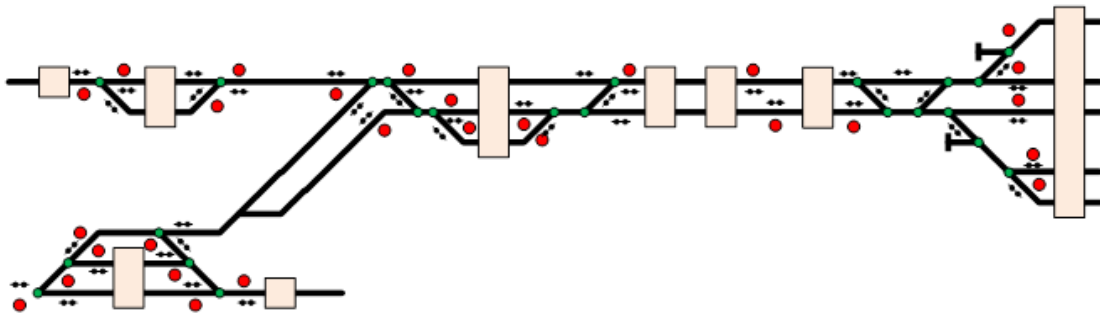


Abbildung 4: Mikroskopisches Verkehrsmodell aus (Flamm & Meirich, 2018)

- **Mesoskopische Ebene:**

Die mesoskopische Ebene arbeitet zwischen den anderen beiden Ansätzen, um einen Ausgleich zwischen hohem Detaillierungsgrad und niedrigem Rechenaufwand zu erzielen. Dieser Ansatz eines Verkehrsmodells wird in den folgenden Simulationen verfolgt. Zwar arbeitet SUMO vom Prinzip auf der mikroskopischen Ebene (Standort Weichen, Haltestellen, Signale), aber für die Aufgabenstellung sind Daten wie Zugsicherungskomponenten oder Infrastrukturkomponenten wie z.B. Achszähler nicht notwendig.

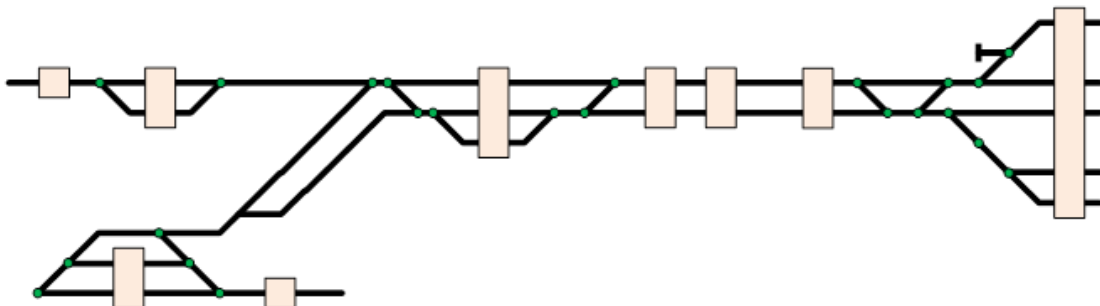


Abbildung 5: Mesoskopisches Verkehrsmodell aus (Flamm & Meirich, 2018)

2.2.4 Simulation of Urban MObility (SUMO)

SUMO ist eine vom DLR entwickelte Open Source Software bzw. Simulationsplattform für mikroskopische Verkehrssimulationen. Durch die vollwertige Software-Suite, bestehend aus etlichen Hilfsprogrammen, wird den Nutzern das Einrichten, Durchführen und Regeln von Simulationen vereinfacht. Mit SUMO können neue Verkehrsstrategien umgesetzt und analysiert werden, bevor sie im realen Straßenverkehr eingesetzt werden.²³ Aber auch bereits bestehende Verkehrssysteme können nachmodelliert und durch verschiedene Szenarien getestet und hinsichtlich ihrer Tauglichkeit überprüft werden. Via „Traffic Control Interface“ (TraCI), können Nutzer online auf eine laufende Simulation zugreifen und diese in Echtzeit steuern und manipulieren. Die Erweiterung von SUMO mit einer Modellierung und Simulation des Verkehrsträgers Schiene wird seit einiger Zeit am DLR vorgenommen und auch mittels der Bearbeitung dieser Arbeit forciert. SUMO ermöglicht die Modellierung verschiedener Verkehrsträger (Straße, Schiene, Bus, Tram, Fuß). Dadurch können von dem Anwender intermodale Reiseketten definiert werden, die während ihrer Reise zwischen den Verkehrsträgern „springen“ können. Mit der Anwendung SUMO GUI kann der Nutzer die Simulation in verschiedenen Geschwindigkeiten abspielen und Einstellungen während der Simulation anpassen. Die folgende Abbildung 6) zeigt die grafische Benutzeroberfläche einer Verkehrssimulation in SUMO GUI.

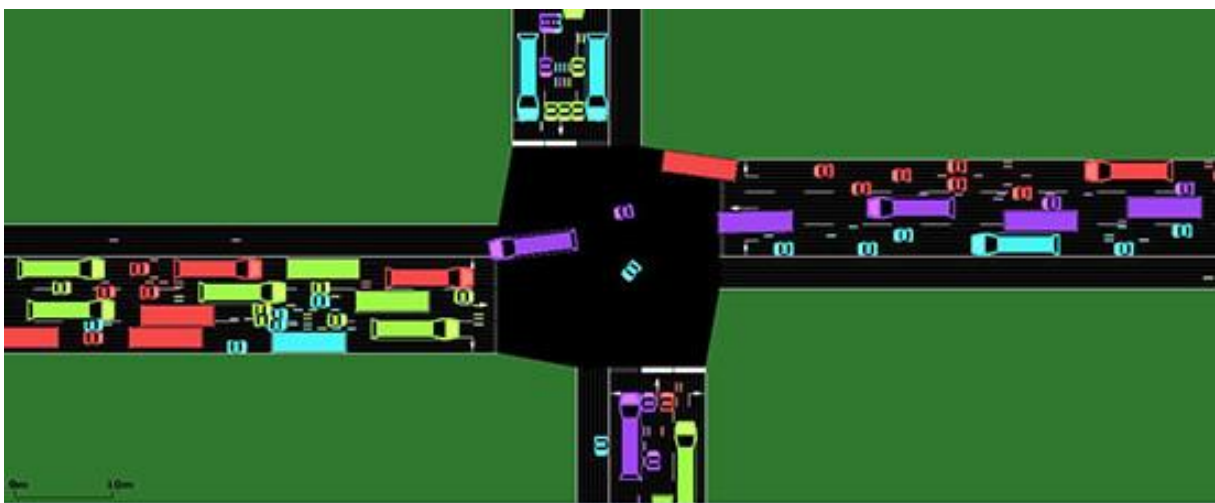


Abbildung 6: Grafische Benutzeroberfläche SUMO GUI aus (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 2018)

²³ Vgl. (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 2018)

3 Modellierung der Simulationsumgebung

3.1 Infrastruktur

Dieser Abschnitt beschreibt die Eisenbahninfrastruktur, die in der Simulationssoftware modelliert werden muss, um bestimmte Zuglinien simulieren zu können.

Das deutsche Streckennetz besteht sowohl aus Schnellfahrstrecken (SFS) bzw. Hochgeschwindigkeitsverkehren (HGV) für den Fernverkehr, als auch aus Regionalverkehren für den Nahverkehr. Das SFS-Streckennetz besteht zum größten Teil aus Ausbaustrecken, sowie sechs Neubaustrecken für Geschwindigkeiten zwischen 200 km/h bis 300 km/h. Sonstige Strecken im Bereich des Nahverkehrs sind für Höchstgeschwindigkeiten von 160 km/h zugelassen. Eine Übersicht der einzelnen Strecken bietet folgende Abbildung 7).

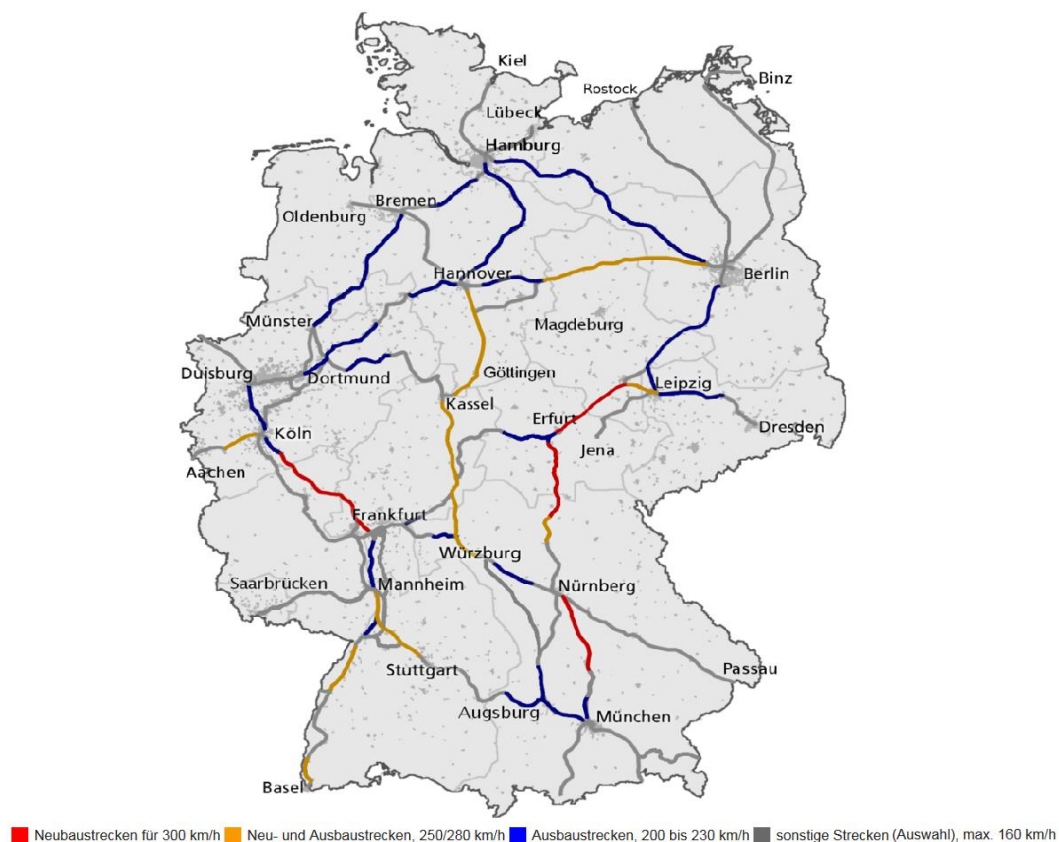


Abbildung 7: Schnellfahrstrecken in Deutschland aus (Wikimedia Foundation Inc., 2018)

Für die folgenden Simulationen werden die Strecken zwischen Frankfurt, Hannover, Berlin, Bremen, Hamburg und Bremerhaven (Abbildung 8) untersucht. Geodaten sowie Streckeninformationen, wie Haltestellenabfolge, Lichtsignalanlagen (LSA, Weichen, etc. werden durch das Projekt OpenStreetMap in einer Datenbank gesammelt und frei zur Verfügung gestellt. Die fertigen Netzwerkdaten werden in einem .osm-Format (XML-Format) ausgetauscht und dargestellt.

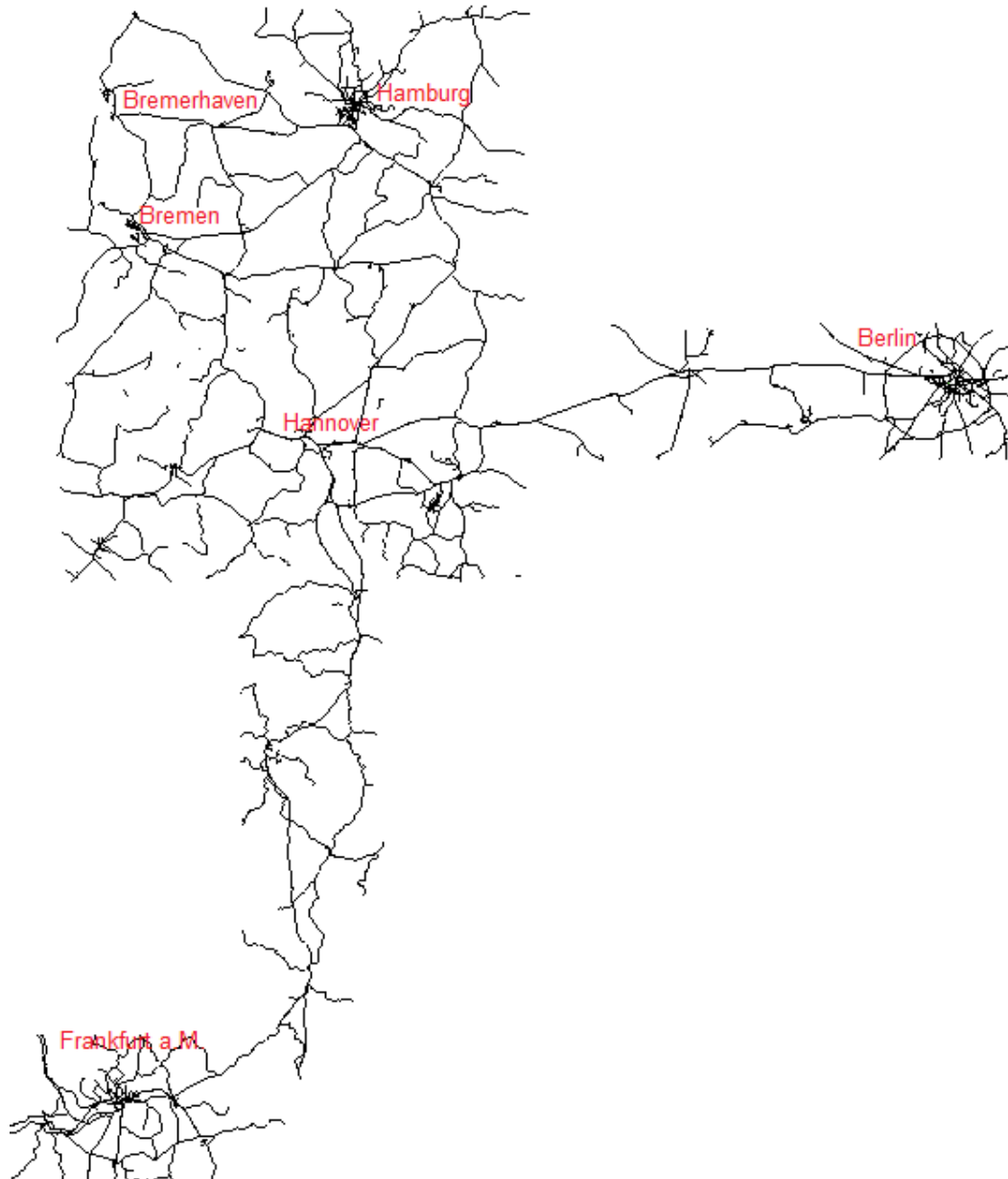


Abbildung 8: Liniennetzplan SUMO

Vergleicht man nun den Untersuchungsraum (Abbildung 8) mit dem Streckennetz von Deutschland (Abbildung 7), werden sowohl HGV-Verkehre als auch Regionalverkehre innerhalb der Simulation berücksichtigt. Als Schnellfahrstrecke werden z.B. die Abschnitte zwischen Frankfurt und Hannover, Hannover und Berlin, Hannover und Hamburg sowie ein Teilabschnitt zwischen Bremen und Hamburg betrieben. Streckenabschnitte für den Regionalverkehr befinden sich auf Routen wie z.B. von Hannover nach Bremen und von Bremen nach Bremerhaven. Somit lassen sich anhand dieser Simulationsumgebung Anschlussbeziehungen an den drei Knotenbahnhöfen, Überholvorgänge, sowie Verkehre in ländliche Umgebungen simulieren (siehe Abbildung 9 oder Abbildung 10)

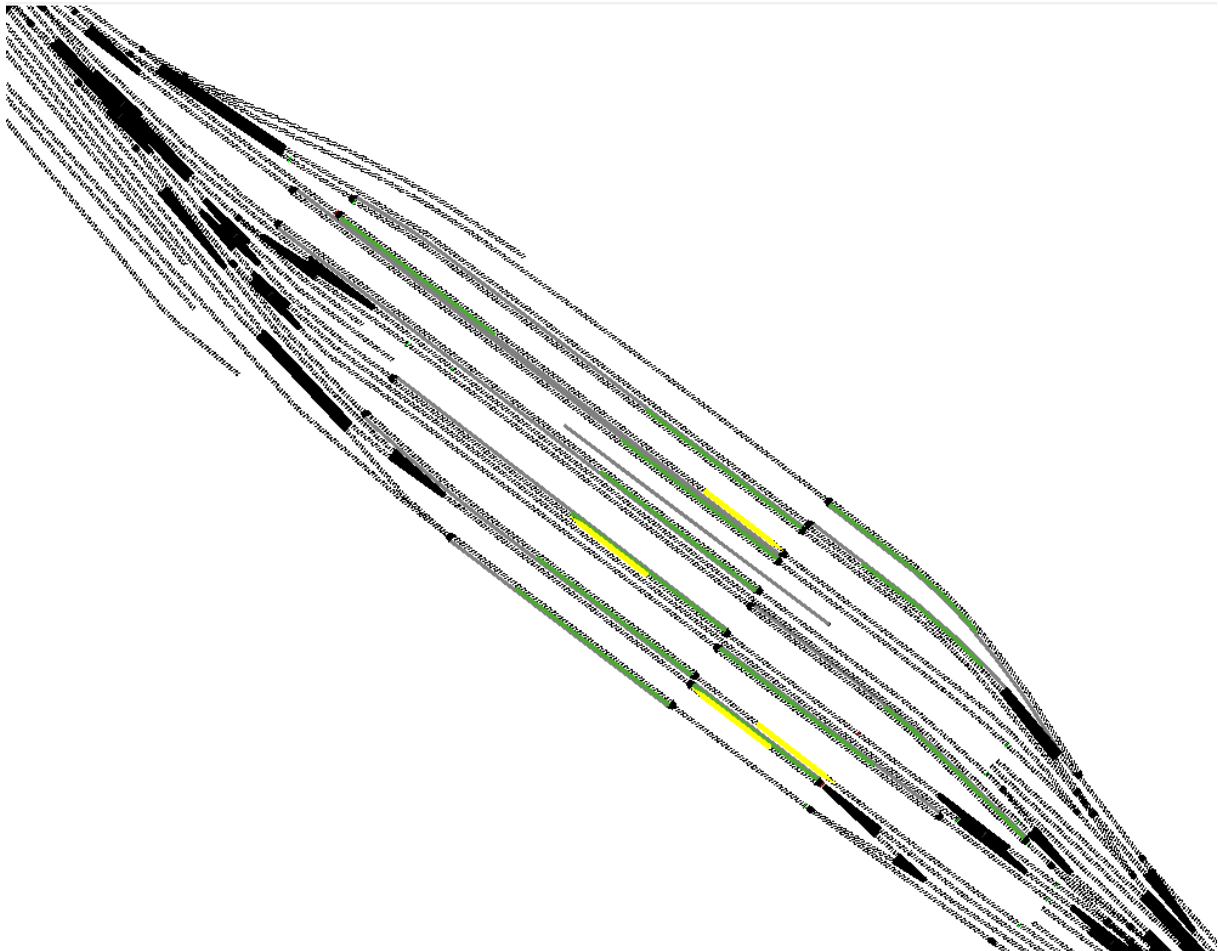


Abbildung 9: Hannover Hauptbahnhof in SUMO in der „standard“ Ansicht

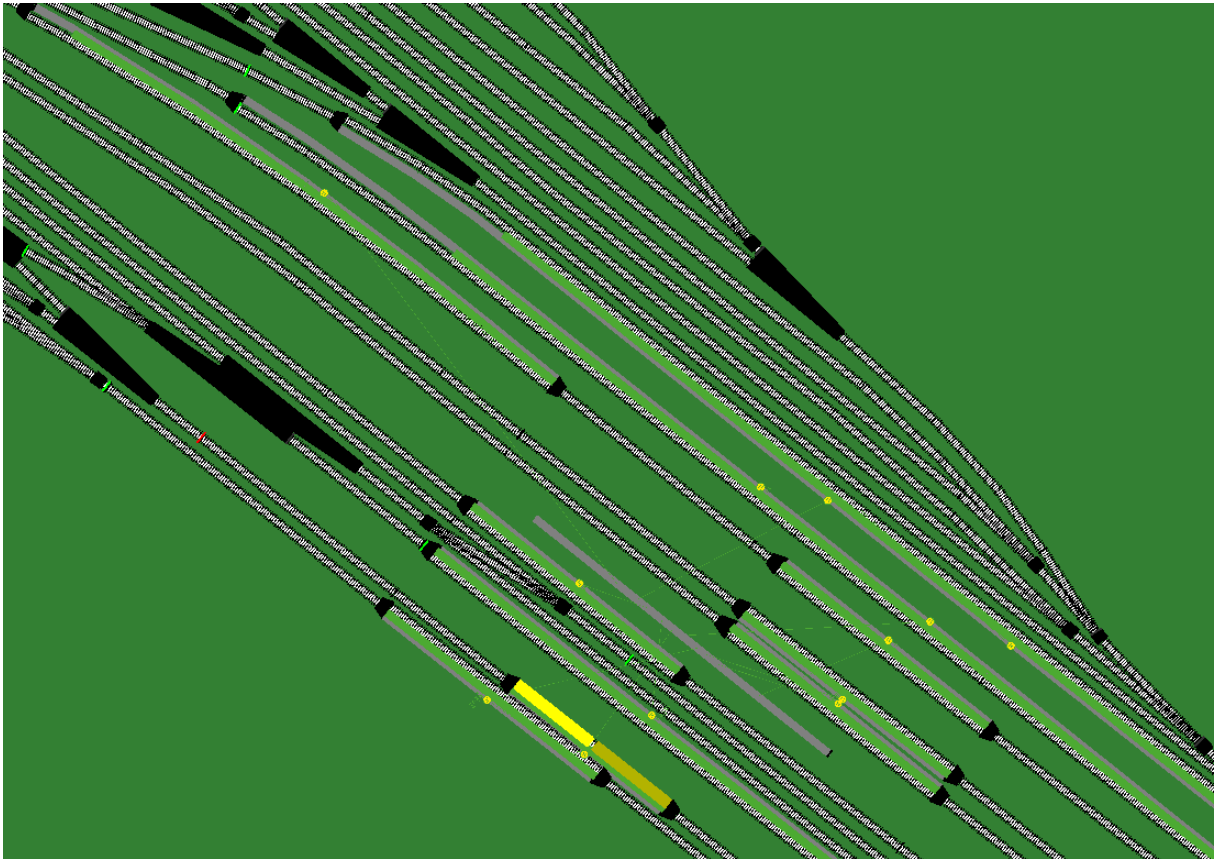


Abbildung 10: Bremen Hauptbahnhof in der "real world" Ansicht

Dieser Untersuchungsraum ist für die folgenden Simulationen ausgewählt wurden, da hier sowohl Fernverkehre, mit Überholvorgängen als auch Nahverkehre in ländliche Umgebungen untersuchen werden können. Zudem zählt der Hannover Hauptbahnhof als zentraler Kreuzungsbahnhof für Umsteigvorgänge, sodass Anschlussbeziehungen und somit auch die Anschlusssicherheit für den Reisenden mit berücksichtigt wird. Dadurch können Reiseketten abgebildet werden, die durch Störungen des Bahnsystems ihren Anschluss an wichtigen Knotenpunkten verpassen und somit nicht pünktlich am Zielbahnhof ankommen.

3.2 Fahrplan

„Ein Fahrplan legt den Fahrtverlauf im öffentlichen Personenverkehr fest und beinhaltet neben den Ankunfts-, Abfahrts- und Durchfahrtszeiten auch Angaben zu der Zugnummer, dem Laufweg, den Verkehrstagen sowie der zulässigen Geschwindigkeit in den einzelnen Abschnitten des Laufwegs.“²⁴

Die Aufstellung eines Fahrplans dient drei grundsätzlichen Aufgaben:

1. Koordination der Trassenwünsche
2. Beschreibung des Soll-Betriebsablaufs
3. Information für den Kunden/Reisenden

Bei der Fahrplankonstruktion setzt sich zunehmend die Einführung eines Taktfahrplans durch, „bei dem Linien des öffentlichen Personenverkehrs in regelmäßigen, sich periodisch wiederholenden Abständen (Taktfrequenz) betrieben werden.“²⁵

3.2.1 Liniengebundener Taktfahrplan

Bei einem liniengebundenen Taktfahrplan besitzt jede einzelne Linie einen eigenständigen Fahrplan mit Takt. Bei diesem Konzept wird keine Anschlusssicherheit garantiert, da die Pläne jeder Linien unabhängig voneinander konzipiert werden. Ein liniengebundener Taktfahrplan ist nur für Verkehrsangebote mit hoher Taktfolge sinnvoll.

²⁴ (Pachl, 2004, S. 189)

²⁵ Vgl. (Pachl, 2004, S. 217)

3.2.2 Integraler Taktfahrplan

Der integrale Taktfahrplan (ITF) beschreibt ein Konzept der Fahrplankonstruktion, welches Taktfahrpläne einzelner Linien miteinander verknüpft, um eine Anschlusssicherheit an Knotenpunkten zu gewährleisten. Durch die Verknüpfung einzelner Taktfahrpläne entsteht ein vertaktetes Gesamtnetz. Das Grundprinzip eines integralen Taktfahrplans wird in der folgenden Abbildung 11) veranschaulicht.

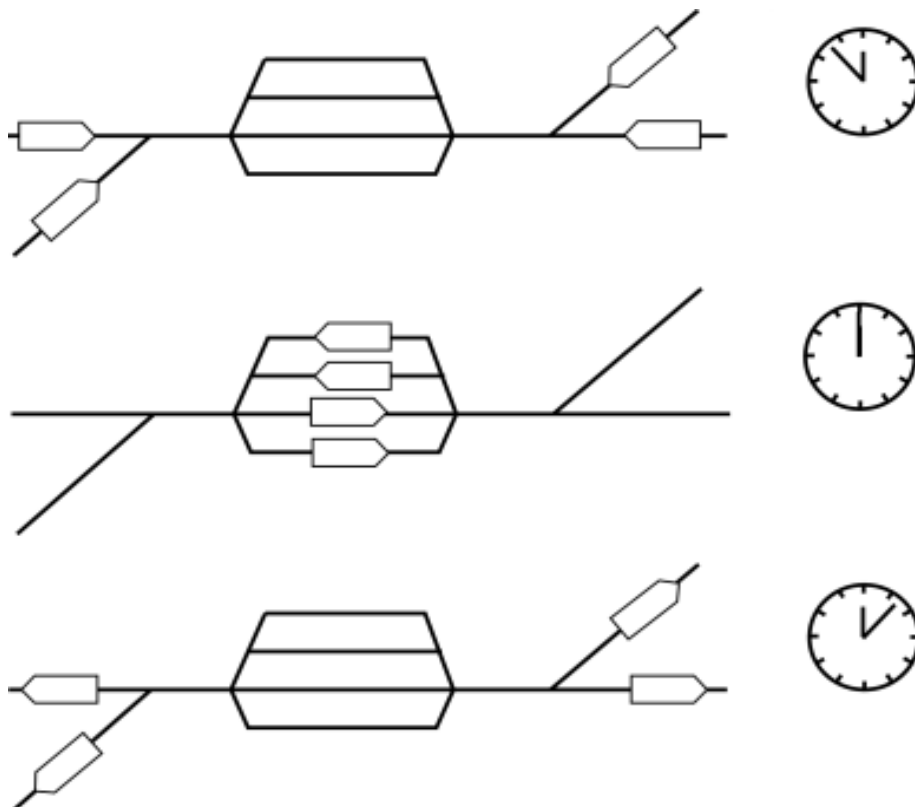


Abbildung 11: Grundprinzip eines integralen Fahrplans aus (Pachl, 2004)

„Als ITF-Systemzeit wird üblicherweise die volle oder halbe Stunde gewählt.“²⁶ Wie in der Abbildung 11) zu sehen ist, fahren Züge unterschiedlicher Linien kurz vor der ITF-Systemzeit in einen ITF-Knoten ein. „Die Taktzeiten sind dabei derart aufeinander abgestimmt, dass während des Haltes [...] zwischen allen Linien umgestiegen werden kann.“²⁷ Um Verfrühungen oder Verspätungen entgegenzuwirken werden sogenannte ITF-Synchronisationszeiten eingesetzt. ITF-Synchronisationszeiten werden bevorzugt als planmäßige Wartezeiten in ITF-Knoten gelegt, um Verspätungsübertragungen durch Anschlussbindungen zu vermeiden. „Vertaktete Fahrplansysteme gehören [...] zum Standard im Personenverkehr.“²⁸

²⁶ (Pachl, 2004, S. 217)

²⁷ (Pachl, 2004, S. 217)

²⁸ (Pachl, 2004, S. 216)

3.2.3 Simulationsgebundene Fahrplandaten

Zeiten des simulationsgebundenen Fahrplans entstammen einer Verkehrssimulation unter der Annahme eines störungsfreien Betriebs und einer festen Aufenthaltsdauer je Halt von 30 Sekunden. Die Fahrplandaten für die zu untersuchenden Reiseketten entstammen aus der Reiseauskunft der DB. Hierfür wird der 13.06.2018 innerhalb eines Zeitfensters von 14:30 Uhr bis 20:00 Uhr untersucht. Die ausgewählten Routen werden somit an realistische Abfahrts-, Umsteige- sowie Ankunftszeiten gebunden und dargestellt, siehe Abbildung 12).

```
<!-- Frankfurt -> Hannover -->
<trip id="IC_2370" type="pt_train" depart="14:47:00" from="154495031" to="330844192" line="IC_26:1" departPos="base">
  <param key="completeness" value="1.00"/>
  <stop busStop="2821098767" duration="00:02:00" until="14:49:00"/> <!-- Frankfurt (Main) Hbf 14:49-->
  <stop busStop="31027610" duration="00:02:00" until="15:17:00"/> <!-- Friedberg (Hessen) 15:15-15:17 -->
  <stop busStop="26417437" duration="00:01:00" until="16:33:00"/> <!-- Wabern (Bz Kassel) 16:32-16:33 -->
  <stop busStop="2821187061" duration="00:02:00" until="16:55:00"/> <!-- Kassel-Wilhelmshöhe 16:53-16:55 -->
  <stop busStop="394660653" duration="00:02:00" until="17:16:00"/> <!-- Göttingen 17:14-17:16 -->
  <stop busStop="2712496371" duration="00:02:00" until="17:58:00"/> <!-- Hannover Hauptbahnhof 17:56 -->
</trip>
```

Abbildung 12: Abfahrts-, Umsteige-,Ankunftszeiten

Vor- und Nachlaufzeiten werden in der Simulation der Reiseketten nicht beachtet, da für die zu untersuchende Verspätungskennzahl lediglich der Hauptlauf ausschlaggebend ist. Bis auf die NordWestBahn, die in einem halbstunden Takt verkehrt, sind alle restlichen Fahrten als „Trips“ (einzelne Fahrten) definiert, um Störungen auf der Strecke vereinfacht simulieren zu können. Somit ergeben sich folgende Fahrten:

Tabelle 2: Zugfahrten mit Hauptlauf

ID	Startbahnhof	Zielbahnhof	Depart
IC 2370	Frankfurt (Main)	Hannover	14:47
IC 1926	Hannover	Berlin	18:03
IC 1053	Hannover	Berlin	18:31
IC 1914	Hannover	Berlin	19:01
IC 2038	Hannover	Bremen	14:43
NWB RS2	Bremen	Bremerhaven	12:10 (30min Takt)
RE9	Bremen	Bremerhaven	16:55
ICE 546	Berlin	Hannover	14:49
ICE 788	Hannover	Hamburg	16:35
ICE 74	Hannover	Hamburg	17:18
ICE 586	Hannover	Hamburg	17:34

3.3 Reiseketten

Die Transport- bzw. Reisekette wird nach der DIN 30781 wie folgt definiert: „Folge von technisch und organisatorisch miteinander verknüpften Vorgängen, bei denen Personen oder Güter von einer Quelle zu einem Ziel bewegt werden.“²⁹

Ein wesentliches Merkmal einer Transport- bzw. Reisekette ist die Ortveränderung in einer dafür benötigten Zeit. Während einer Transport- bzw. Reisekette können Wechsel zwischen Verkehrsträgern oder Transportmitteln stattfinden. Im Bahnbetrieb kann es durch den Verlust einer Anschlussmöglichkeit zu einem Bruch der geplanten Reisekette kommen.

In dem folgenden Abschnitt werden drei Reiseketten definiert, die unterschiedliche Quelle-Ziel-Verkehre aufweisen. Alle Reiseketten sind bereits zehn Minuten vor Abfahrt am Abfahrtsbahnhof. Alle Reiseketten bevorzugen eine schnelle Verbindung zum Zielbahnhof. Dabei ist ein Zwischenhalt an einem Knotenbahnhof zu beachten, um Anschlussbeziehungen untersuchen zu können.

²⁹ (Deutsches Institut für Normung e.V., 1989)

1. Reisekette: Erika Mustermann plant für ein Konzert eine Fahrt aus Frankfurt (Main) nach Berlin. Ihre Fahrt wählt sie über den Zwischenstopp in Hannover, da ihre beste Freundin dort mitzusteigt.

Frankfurt(Main)Hbf
Berlin Hbf

14:49 ⚠️
19:54

5:05 1 IC ⁹

Verbindung liegt in der Vergangenheit
🚫

Details verbergen

> Rückfahrt hinzufügen

Weichenstörung: Auf der Strecke Berlin-Spandau - Wustermark zwischen Berlin-Spandau und Wustermark. Es kommt zu Verspätungen in beide Richtungen im Fernverkehr der Deutschen Bahn.

Bahnhof/Haltestelle	Zeit	Gleis	Produkte	Weitere Informationen
Frankfurt(Main)Hbf	ab 14:49	12	IC 2370	Intercity Richtung: Hamburg-Altona
Hannover Hbf	an 17:56 17:56	8		Fahrradmitnahme reservierungspflichtig, Fahrradmitnahme begrenzt möglich, Snacks und Getränke am Platz
📞 Umsteigezeit 9 Min. ⓘ Aktuell keine zuverlässige Information zum Anschluss möglich > Umsteigezeit anpassen				
Hannover Hbf	ab 18:05 18:05	9	IC 1926 ⁹	Intercity Richtung: Berlin Ostbahnhof
Berlin Hbf	an 19:54 19:54	12		Fahrradmitnahme reservierungspflichtig, Fahrradmitnahme begrenzt möglich, Bordbistro

> Zwischenhalte einblenden

📅 In Kalender eintragen

Hinweise
fährt nicht täglich, 13., 14. Jun
Aktuelle Informationen zu Ihrer Verbindung:
⚠️ **IC 1926: Hannover Hbf->Berlin Hbf: Information.** Nur noch wenige Plätze frei. Wir empfehlen eine Sitzplatzreservierung.

Bahnhofsinformationen Kartenansicht > Suche aus dem fahrenden Zug

Abbildung 13: Reiseauskunft von Frankfurt (Main) nach Berlin aus DB Reiseauskunft

Hannover Hbf Berlin Hbf (tief)	18:33 ⚠️ 20:09	1:36 0 ICE	111,90 EUR ^{incl.} in der 1.Klasse	72,00 EUR
Details einblenden		> Rückfahrt hinzufügen	Zur Angebotsauswahl	
Hannover Hbf Berlin Hbf	19:03 ⚠️ 20:58	1:55 0 IC	53,90 EUR	56,00 EUR
Details einblenden		> Rückfahrt hinzufügen	Zur Angebotsauswahl	

Abbildung 14: Fahrten im Störfall von Hannover nach Berlin (ICE 1053 und IC 1914) aus DB Reiseauskunft

2. Reiskette: Max Mustermann ist ein Berufspendler. Er fährt täglich vom Bremerhaven Hbf zu seiner Arbeitsstelle nach Hannover und zurück. Seine Rückfahrt sieht wie folgt aus:

Hannover Hbf	ab 14:45	11	IC 2038	Intercity Richtung: Emden Hbf Fahrradmitnahme reservierungspflichtig , Fahrradmitnahme begrenzt möglich , Snacks und Getränke am Platz , Fahrzeuggebundene Einstiegshilfe vorhanden , Intercity 2: Info unter www.bahn.de/ic2
Bremen Hbf	an 15:50 15:56	3		

Umsteigezeit 20 Min. Anschluss vsl. erreichbar > Umsteigezeit anpassen

Bremen Hbf	ab 16:10 16:10	6	NWB RS2	NordWestBahn Richtung: Bremerhaven-Lehe Fahrradmitnahme begrenzt möglich , Reservierung kostenlos: Anmeldung Fahrradmitnahme bis 17 Uhr am Vortag , nur 2. Klasse , Konsum alkoholischer Getränke im Zug verboten , NordWestBahn-Servicetelefon: 01806 / 600161* , (*20 ct/Anruf aus dem Festnetz, Tarif bei Mobilfunk max. 60 ct/Anruf)
Bremerhaven Hbf	an 16:55 16:55	5		

> Zwischenhalte einblenden Verspätungs-Alarm In Kalender eintragen

Hinweise
fährt Mo - Fr, nicht 3. Okt

☐ Bahnhofsinformationen ☐ Kartenansicht > Suche aus dem fahrenden Zug

Abbildung 15: Reiseauskunft von Hannover nach Bremerhaven aus DB Reiseauskunft

Bremen Hbf	16:40 16:40	0:45	0	NWB	Preisauskunft nicht möglich
Bremerhaven Hbf	17:25 17:25				

☐ Details einblenden > Rückfahrt hinzufügen

Bremen Hbf	16:56	0:34	0	RE	Preisauskunft nicht möglich
Bremerhaven Hbf	17:30				



☐ Details einblenden > Rückfahrt hinzufügen

Abbildung 16: Fahrten im Störfall von Bremen nach Bremerhaven (NWB RS2 und RE9) aus DB Reiseauskunft

3. Reisekette: Familie Mustermann möchte ein paar Tage in Hamburg an der Elbe verbringen. In Hannover müssen sie umsteigen, sodass sich folgende Fahrt ergibt:

Berlin Hbf (tief)	ab 14:51	5 D - G	ICE 546	Intercity-Express Richtung: Düsseldorf Hbf Komfort Check-in möglich http://bahn.de/komfortcheckin , Bordrestaurant
Hannover Hbf	an 16:28	12	ICE 556	
Umsteigezeit 9 Min. > Umsteigezeit anpassen				
Hannover Hbf	ab 16:37	7	ICE 788	Intercity-Express Richtung: Hamburg-Altona Komfort Check-in möglich http://bahn.de/komfortcheckin , Bordrestaurant
Hamburg Hbf	an 17:55	8		
<div>> Zwischenhalte einblenden</div> <div> Verspätungs-Alarm In Kalender eintragen</div>				
<div>Hinweise fährt nicht täglich, 13. bis 24. Jun 2018</div>				
<div> Bahnhofsinformationen Kartenansicht</div>				

Abbildung 17: Reiseauskunft von Berlin nach Hamburg aus DB Reiseauskunft

Hannover Hbf	17:20	1:15	0	ICE	Verbindung liegt in der Vergangenheit
Hamburg Hbf	18:35				
 Details einblenden		> Rückfahrt hinzufügen			



Hannover Hbf	17:36	1:17	0	ICE	Verbindung liegt in der Vergangenheit
Hamburg Hbf	18:53				
 Details einblenden		> Rückfahrt hinzufügen			

Abbildung 18: Fahrten im Störfall von Hannover nach Hamburg (ICE 74 und ICE 586) aus DB Reiseauskunft

Um sicherzustellen dass die Start- und Zielkanten im Fußgängernetz zur Verfügung stehen, wird jedem Haltepunkt ein Bahnsteig zugewiesen. Darüber hinaus werden alle Haltepunkte die beieinander liegen durch Deklarationen „access“ untereinander verbunden, sodass Umsteige-vorgänge ermöglicht werden.

3.4 Verspätungsarten im Eisenbahnverkehr

Grundsätzlich werden Verspätungen in Verspätungen mit einem lokalen und Verspätungen mit einem kausalen Bezug unterschieden. Diese können entweder durch interne oder externe Störungen entstehen und stellen die wesentlichen Kennzahlen dar, die es in dieser Arbeit zu untersuchen gilt.

Während bei den kausalen Verspätungen der Grund der Verspätung im Vordergrund steht, ist bei der lokalen Verspätung der Entstehungsort entscheidend. Eine Übersicht der verschiedenen Verspätungsarten und deren Entstehung sind in der nachfolgenden Tabelle 3) dargestellt.

Tabelle 3: Verspätungsarten nach DB Netz AG Richtlinie 405

Verspätungsbegriffe mit einem kausalen Bezug	
Urverspätung	Außerplanmäßige Fahr- und Haltezeiten: -Störungen von Anlagen, Betriebsmitteln, Personal oder Sonstiges -keine Interaktion mit anderen Zügen
Folgeverspätung	Außerplanmäßige Fahr- und Haltezeiten: -Störungen aus Interaktion mit anderen Zügen, aufgrund von bereits existierenden Verspätungen oder Verfrühungen
Verspätungsbegriffe mit einem lokalen Bezug	
Einbruchsverspätung	Differenz zwischen geplanten und tatsächlichen Zeitpunkt des Einbrechens in das Teilnetz
Ausbruchsverspätung	Differenz zwischen geplanten und tatsächlichen Zeitpunkt des Ausbrechens aus dem Teilnetz
Abfahrtsverspätung	Differenz zwischen geplanten und tatsächlichen Zeitpunkt der Abfahrt an einer Betriebsstelle
Ankunftsverspätung	Differenz zwischen geplanten und tatsächlichen Zeitpunkt der Ankunft an einer Betriebsstelle
Verspätungsbegriffe der Summen	
Zusatzverspätung	Summe aller Ur- und Folgeverspätungen innerhalb des Teilnetzes
Erregerverspätung	Summe aus Einbruchs- und Urverspätungen
Gesamtverspätung	Summe aus Erreger- und Folgeverspätung

Wie in der Tabelle 3 zu sehen ist, lassen sich bei Ur- und Folgeverspätungen kausale Bezüge erkennen, die jedoch einen unterschiedlichen Grund für die Entstehung der Verspätung aufzeigen. Während Urverspätungen aufgrund Störungen von Anlagen, Betriebsmitteln, Personalen oder sonstigen ungeplanten Ereignissen wie zum Beispiel dem Wetter aufweisen, entstehen Folgeverspätungen durch die Interaktion mit anderen Zügen aufgrund bereits existierender Verspätungen und/oder Verfrühungen. In beiden Fällen lässt sich anhand einer Simulation der Grund, aber auch der Entstehungsort nachweisen. Obwohl Urverspätungen sowohl Fahr- als auch Haltezeiten aufweisen, werden sie bei eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Untersuchungen zumeist als Haltezeitverlängerung in die Knoten gelegt, während Folgeverspätungen sowohl auf der Strecke als auch im Knoten entstehen können.³⁰

Anders als bei den Verspätungsarten mit einem kausalen Bezug, lässt sich bei den Verspätungsarten mit einem lokalen Bezug kein direkter Entstehungsgrund identifizieren. Aus der Tabelle 3 ist abzuleiten, „dass sie entweder an den Grenzen eines Streckenabschnittes oder der Betriebsstellen bzw. Knoten abzulesen sind.“³¹

Anhand dieser Definitionen können für die folgenden Simulationen Störungen ausgearbeitet werden, die als Verspätungsarten aus der Tabelle 3 in das geschaffene Simulationsmodell implementiert werden, um mögliche Auswirkungen auf die KPI aufzuzeigen und/oder auszuschließen.

³⁰ Vgl. (DB Netz AG, 2008)

³¹ (Schneider, 2016, S. 35)

3.5 Störungsszenarien

Ein Störungsszenario bildet einen gestörten Betrieb ab, der nicht dem „Nullfall“ entspricht und zu Verspätungen im Betriebsablauf führt. Der Begriff „Nullfall“ beschreibt hier den optimalen Ausgangszustand des Bahnsystems, an welchem das Ausmaß einer Störung und die Wirkung der Gegenmaßnahmen gemessen werden kann.

Störungen können auf unterschiedlichste Art und Weise auftreten, seien es technische Probleme, menschliches Versagen oder wetterbedingte Ausfälle. Jedoch haben alle Störungen eine Gemeinsamkeit, sie rufen ein unvorhersehbares Ereignis hervor, auf das reagiert werden muss, um den Betrieb fortführen zu können. Störungen im simulierten Betriebsablauf schlagen sich in verpasste Anschlüsse und erhöhten Reisezeiten nieder.

Für die folgenden Simulationen werden vier Störungen ausgearbeitet, die unterschiedliche Verspätungen hervorrufen:

1. **Störung „Erhöhtes Reiseaufkommen“:** Erhöhte Reiseaufkommen führen meistens zu Verzögerungen beim Ein- und Ausstieg der Fahrgäste. Durch die längeren Umsteigezeiten resultieren häufig Abfahrtsverspätungen an den Bahnhöfen.
2. **Störung „Fahrzeuge“:** Der zweit häufigste Grund für Verspätungen im Eisenbahnbetrieb, sind alte und defekte Fahrzeuge, die durch Ersatzfahrzeuge ersetzt werden müssen.³²
3. **Störung „Schienensuizid“:** Ein unangenehmes Thema, jedoch die viert häufigste Ursache für Verspätungen im Bahnbetrieb.³³ Knapp 800 Todesfälle gab es im Jahr 2016.³⁴ Nach einem „Personenschaden“ erscheint die Polizei und Staatsanwaltschaft am Gleis und der Betrieb auf der Strecke wird unterbrochen.

³² Vgl. (Seher, 2016)

³³ Vgl. (Seher, 2016)

³⁴ Vgl. (Eisenbahn-Bundesamt, 2016, S. 27)

4. Störung „Baustellen und Gleise“: Einer der häufigsten Gründe für Verspätungen der Züge, sind Baustellen und ramponierte Gleise auf dem Schienennetz. Teilweise verlängern sich dadurch die Fahrtzeiten um 60 Minuten.³⁵

Mit 17 Prozent ist die Verspätung aus einem vorausfahrendem Zug der häufigste Grund für Verzögerungen im unmittelbaren Bahnbetrieb, aber auch Bauarbeiten (12 Prozent) und technische Störungen (11 Prozent) auf der Strecke gehören zu den häufigsten Ursachen.³⁶ 798 Suizidfälle gab es in dem Jahr 2016, die durchschnittlichen Verspätungsminuten durch Notarzteinsätze am Gleis betragen dabei 27 Minuten.³⁷

Für die Untersuchungen werden alle Störungen, die zu Verspätungen im Bahnbetrieb führen mit jeder Reisekette simuliert, sodass jede Reisekette vier unterschiedliche Ergebnisse hat. Störungen werden in der Simulation als sogenannte „stops“ definiert. Durch diese Methode können Störungen mitten auf der Strecke simuliert werden, in dem der Zug für eine gewisse Zeit einen Stopp einlegt. Als Beispiel für die Definition einer Störung in der Simulation, dient folgende Abbildung 19).

```
<!-- Frankfurt -> Hannover -->
<trip id="IC_2370" type="pt_train" depart="14:47:00" from="154495031" to="330844192" line="IC_26:1" departPos="base">
  <param key="completeness" value="1.00"/>
  <stop busStop="2821098767" duration="00:02:00" until="14:49:00"/> <!-- Frankfurt (Main) Bf 14:49 -->
  <stop lane="154495027_1" endPos="157" duration="01:00:00"/> <!-- Störung Baustelle und Gleise 60min -->
  <stop busStop="31027610" duration="00:02:00" until="15:17:00"/> <!-- Kassel-Wilhelmshöhe 15:15-15:17 -->
  <stop busStop="26417437" duration="00:01:00" until="16:33:00"/> <!-- Wabern (Bz Kassel) 16:32-16:33 -->
  <stop busStop="2821187061" duration="00:02:00" until="16:55:00"/> <!-- Kassel-Wilhelmshöhe 16:53-16:55 -->
  <stop busStop="394660653" duration="00:02:00" until="17:16:00"/> <!-- Göttingen 17:14-17:16 -->
  <stop busStop="2712496371" duration="00:02:00" until="17:58:00"/> <!-- Hannover Hauptbahnhof 17:56 -->
</trip>
```

Abbildung 19: Störung "Baustelle und Gleise" definiert als "stop"

³⁵ Vgl. (Seher, 2016)

³⁶ Vgl. (Rheinische Post Digital GmbH, S. 2)

³⁷ Vgl. (Rheinische Post Digital GmbH, S. 6)

3.6 Key Performance Indicators

„Als Key Performance Indicators (KPI) werden Schlüsselkennzahlen bezeichnet, die die unternehmerische Leistung und deren Erfolg oder Misserfolg widerspiegeln.“³⁸ Je nach Unternehmen und Bereich werden unterschiedliche KPI zur Messung der internen Leistung herangezogen. Dadurch können sämtliche Prozesse kontrolliert und gemessen werden. Betrachtet man in dieser Hinsicht die KPI eines EVU, werden diese herangezogen, um die geplante, erbrachte, wahrgenommene und erwartete Dienstleistungsqualität nach dem Prinzip des Qualitätskreises zu messen (Kapitel 2.1.3). Die Ergebnisse der Messungen helfen den Betreibern bestehende Mängel zu identifizieren und diese zu verbessern.

Da maßgeblich die Pünktlichkeit des Bahnsystems aus der Sicht der Reisenden für die Zufriedenheit und somit für eine hohe Betriebsqualität spricht, werden in dem folgenden Abschnitt die KPI betrachtet, die für die Simulationen hinsichtlich ihrer Tauglichkeit zur Bewertung der Betriebsqualität aus der Sicht der Reisenden untersucht werden könnten.

- Verspätung am Umsteigebahnhof
- Verspätung am Zielbahnhof
- Verspätung am Zielort

Die wesentlichen Kennzahlen, die es für die folgenden Simulationen zu untersuchen gilt, sind die Verspätungen der Reisenden am Umsteige- und Zielbahnhof. Dadurch lassen sich relativ einfach Unterschiede zu zugbezogenen Verspätungskennzahlen feststellen oder ausschließen. Ein weiterer Aspekt vorerst nur diese KPI zu betrachten, ist, dass die Mobilität vom Zielbahnhof bis hin zur vollständigen Beendigung der Reisekette, das Erreichen des Zielorts, durch verschiedene Einflussfaktoren wie z.B. altersbedingte Einschränkungen, ÖV Anbindungen und/oder den Umstieg der Reisenden auf den MIV abhängt.

³⁸ (reimus.NET GmbH)

Aber auch aus Sicht der DB ist die Pünktlichkeit der Reisenden an den Umsteige- und Zielbahnhof ein wichtiges Kriterium, da seit dem 01.10.2004 die sogenannte Kundencharta vorsieht, Fahrpreientschädigungen bei Verspätungen über 60 Minuten in Höhe von 20 Prozent an den Reisenden zu erstatten. Darin eingeschlossen sind sowohl Anschlussverluste zwischen Fernverkehrszügen, da diese meistens in einem Stundentakt verkehren, als auch die Übernahme von Hotel- und Taxikosten in Höhe von bis zu 80 Euro pro Reisenden, bei Verspätungen und Ausfällen die eine Reisefortsetzung bis 24 Uhr verhindern. „In dem Jahr 2017 reisten ca. 87 Millionen Fahrgäste mit dem ICE der Deutschen Bahn.“³⁹

Kennzahlen die für die Untersuchung wichtig sind werden während der Simulation mittels SUMO gespeichert und können nach Beendigung in der output.xml Datei ausgewertet werden. Als Beispiel für ein solches Output dient folgende Abbildung 20).

```
<tripinfo id="IC_2370.0" depart="14:49:00" departLane="154495031_1" departPos="135.10" departSpeed="0.00" departDelay="00:00:00" arrival="17:01:46" arrivalLane="330844192_1" arrivalPos="212.89" arrivalSpeed="6.25" duration="02:12:46" routeLength="84503.99" waitingTime="00:36:16" waitingCount="10" stopTime="00:29:14" timeLoss="01:02:45.54" rerouteNo="0" devices="vehroute_IC_2370.0 tripinfo_IC_2370.0 person_IC_2370.0" vType="pt_train" speedFactor="1.00" vaporized=""/>
<personinfo id="Fussballfan" depart="14:39:00">
  <walk depart="14:39:00" departPos="0.00" arrival="14:39:56" arrivalPos="67.95" duration="00:00:56" routeLength="67.95" timeLoss="00:00:07.07" maxSpeed="1.39"/>
  <ride waitingTime="00:30:39" vehicle="IC_2370.0" depart="15:10:35" arrival="17:00:51" arrivalPos="100.00" duration="01:50:16" routeLength="84425.29"/>
  <walk depart="17:00:51" departPos="135.00" arrival="17:11:14" arrivalPos="255.84" duration="00:10:23" routeLength="775.60" timeLoss="00:01:04.57" maxSpeed="1.39"/>
  <ride waitingTime="02:46:31" vehicle="IC_1926.0" depart="19:57:45" arrival="20:25:12" arrivalPos="229.66" duration="00:27:27" routeLength="13496.53"/>
  <walk depart="20:25:12" departPos="229.66" arrival="20:25:25" arrivalPos="214.92" duration="00:00:13" routeLength="14.74" timeLoss="
```

Abbildung 20: Output der Kennzahlen

Anhand der Kennzahl „arrival“ können die Ankunftszeiten der Züge und Reisenden gegenübergestellt und die Simulation eines „Nullfalls“ mit der Simulation einer Störungen verglichen werden. Die Ergebnisse liefern Aussagen über die Verspätungskennzahlen der Züge und Reisenden am Umsteigebahnhof und Zielbahnhof.

³⁹ (Statista, 2018)

4 Simulation und Auswertung

4.1 Szenario „Nullfall“

Die Infrastrukturdaten (Gleise, Bahnsteig-, Weichen- und Hauptsignalstandorte) für das Simulationsmodell werden aus OSM-Daten importiert. Für die folgenden Simulationen werden weitere Rohdaten (Liniennetzplan, Fahrplandaten und Reiseketten) in einem XML-Format in die Simulationsumgebung eingegeben, sodass ein „Nullfall“ (optimaler Betriebsablauf) simuliert werden kann. Dafür bekommt zunächst jeder Zug und jede Person eine eigene ID zugewiesen. Im Anschluss werden die Fahrzeugtypen z.B. „pt_train“ definiert und ihren Klassen z.B. „rail“ zugeteilt. Anhand der vorhandenen OSM-Daten werden Linien rausgesucht, die dieselben Routen fahren, wie die zu untersuchenden Reiseketten (z.B. line="ICE_10:0"). Die Routendaten (Haltestellenabfolge) wie z.B. route="pt_train_IC_26:1" werden für die eigenen Fahrten übernommen und als Trips definiert. Die Abfahrtszeiten (depart) werden für die Start- (from) und Zielpunkte (to) anhand der Reiseauskunftszeiten der DB hinzugefügt. Anschließend wird für den Trip der Reisenden der öffentliche Verkehr als Modi (modes) festgelegt. Die folgenden Abbildung 21), (Abbildung 22) (Abbildung 23) zeigen Ausschnitte der XML-Dateien mit vorhandenen Routendaten aus dem OSM-Projekt, sowie den eigens geplanten Routen und Reiseketten.

```
<flow id="pt_train_RB8:0" type="pt_train" route="pt_train_RB8:0" begin="94.0" end="86494.0" period
  <param key="name" value="RB8 Kassel => Göttingen"/>
  <param key="completeness" value="0.18"/>
</flow>
<flow id="pt_train_356:0" type="pt_train" route="pt_train_356:0" begin="92.0" end="86492.0" period
  <param key="name" value="KBS 356 Ottbergen - Bodenfelde - Northeim (Sollingbahn)"/>
  <param key="completeness" value="0.20"/>
</flow>
<flow id="pt_train_S4:1" type="pt_train" route="pt_train_S4:1" begin="89.0" end="86489.0" period="
  <param key="name" value="S4 Hildesheim Hbf => Bennemühlen"/>
  <param key="completeness" value="0.12"/>
</flow>
<flow id="pt_train_RE_1:0" type="pt_train" route="pt_train_RE_1:0" begin="357.0" end="86757.0" per
  <param key="name" value="RE 1: Göttingen => Glauchau"/>
  <param key="completeness" value="0.19"/>
</flow>
<flow id="pt_train_HEX_330:0" type="pt_train" route="pt_train_HEX_330:0" begin="117.0" end="86517.
  <param key="name" value="HEX 330: Goslar - Bad Harzburg - Halberstadt - Halle"/>
  <param key="completeness" value="1.00"/>
</flow>
<flow id="pt_train_RB67:0" type="pt_train" route="pt_train_RB67:0" begin="332.0" end="86732.0" per
  <param key="name" value="RB67 Bielefeld"/>
  <param key="completeness" value="1.00"/>
</flow>
```

Abbildung 21: Flowdaten aus dem OSM-Projekt

```

<routes xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance" xsi:noNamespaceSchemaLocation:
  <!-- Pedestrian: Erika Mustermann -->
  <person id="Erika Mustermann" depart="14:39:00">
    <personTrip from="154495031" to="240526027" modes="public"/>
  </person>

  <!-- Pedestrian: Max Mustermann -->
  <person id="Max Mustermann" depart="14:35:00">
    <personTrip from="582547048" to="188824713#1" modes="public"/>
  </person>

  <!-- Pedestrian: Familie Mustermann -->
  <person id="Familie Mustermann" depart="14:41:00">
    <personTrip from="240526029" to="27632886#1" modes="public"/>
  </person>

</routes>

<!-- Pedestrian starten 10 Minuten vorher -->

```

Abbildung 22: Selbstdefinierte Persontrips

```

<!-- Frankfurt -> Hannover -->
<trip id="IC_2370" type="pt_train" depart="14:47:00" from="154495031" to="330844192" line="IC_26:1" departPos="base">
  <param key="completeness" value="1.00"/>
  <stop busStop="2821098767" duration="00:02:00" until="14:49:00"/> <!-- Frankfurt (Main) Hbf 14:49-->
  <stop busStop="31027610" duration="00:02:00" until="15:17:00"/> <!-- Friedberg (Hessen) 15:15-15:17 -->
  <stop busStop="26417437" duration="00:01:00" until="16:33:00"/> <!-- Wabern (Bz Kassel) 16:32-16:33 -->
  <stop busStop="2821187061" duration="00:02:00" until="16:55:00"/> <!-- Kassel-Wilhelmshöhe 16:53-16:55 -->
  <stop busStop="394660653" duration="00:02:00" until="17:16:00"/> <!-- Göttingen 17:14-17:16 -->
  <stop busStop="2712496371" duration="00:02:00" until="17:58:00"/> <!-- Hannover Hauptbahnhof 17:56 -->
</trip>

<!-- Hannover -> Berlin (1) -->
<trip id="IC_1926" type="pt_train" depart="18:03:00" from="330844175" to="240526027" line="ICE_10:2" departPos="base">
  <param key="completeness" value="1.00"/>
  <stop busStop="2712496423" duration="00:02:00" until="18:05:00"/> <!-- Hannover Hauptbahnhof 18:05 -->
  <stop busStop="1641739780" duration="00:02:00" until="18:39:00"/> <!-- Wolfsburg Hauptbahnhof 18:37-18:39 -->
  <stop busStop="3101920258" duration="00:02:00" until="19:41:00"/> <!-- Berlin-Spandau 19:39-19:41 -->
  <stop busStop="2813070488" duration="00:02:00" until="19:56:00"/> <!-- Berlin Hauptbahnhof (Tief) 19:54 -->
</trip>

<!-- Hannover -> Berlin (2) -->
<trip id="ICE_1053" type="pt_train" depart="18:31:00" from="330844175" to="240526027" line="IC_32:1" departPos="base">
  <param key="completeness" value="1.00"/>
  <stop busStop="2712496423" duration="00:02:00" until="18:33:00"/> <!-- Hannover Hauptbahnhof 18:33-->
  <stop busStop="1641739780" duration="00:02:00" until="19:05:00"/> <!-- Wolfsburg Hauptbahnhof 19:03-19:05-->
  <stop busStop="3101920258" duration="00:02:00" until="20:00:00"/> <!-- Berlin-Spandau 19:58-20:00-->
  <stop busStop="2813070488" duration="00:02:00" until="20:11:00"/> <!-- Berlin Hauptbahnhof (Tief) 20:09-->
</trip>

```

Abbildung 23: Selbstdefinierte Zugtrips

In diesem Fall wird ohne einen weiteren „stop“ hinzuzufügen ein ganzer Betriebstag ohne Störungen simuliert, sodass ein „Nullfall“ besteht, mit dem die Ergebnisse einer Simulation mit Störung verglichen werden können. Verspätungskennzahlen werden in allen Fällen ab 30 Sekunden auf eine volle Minute aufgerundet.

Das Ergebnis der Simulation eines „Nullfalls“ ist Folgendes:

Tabelle 4: Ankunftszeiten Reisekette "Erika Mustermann"

ID	Depart - Arrival
IC 2370 Frankfurt (Main) - Hannover	14:49:30 - 17:56:40
IC 1926 Hannover - Berlin	18:05:51 - 19:52:29

Tabelle 5: Ankunftszeiten Reisekette "Max Mustermann"

ID	Depart - Arrival
IC 2038 Hannover - Bremen	14:45:23 - 15:50:42
NWB RS2 Bremen - Bremerhaven	16:10:15 - 17:05:17

Tabelle 6: Ankunftszeiten Reisekette "Familie Mustermann"

ID	Depart - Arrival
ICE 546 Berlin - Hannover	14:51:43 - 16:28:45
ICE 788 Hannover - Hamburg	16:37:23 - 17:53:22

4.2 Störungsszenario „Erhöhtes Reiseaufkommen“

An den Startbahnhöfen der Reisenden kommt es durch erhöhte Reiseaufkommen zu verzögerten Abfahrtszeiten der Züge. Die Abfahrtsverspätungen werden als „stops“ von fünf Minuten definiert.



Abbildung 24: Erhöhtes Reiseaufkommen Frankfurter Hauptbahnhof aus (Rippegather, 2018)

Folgende Ergebnisse haben sich mit der Simulation der Störung „Erhöhtes Reiseaufkommen“ ergeben:

Tabelle 7: Ankunftszeiten Reisekette "Erika Mustermann" im Störfall "Erhöhtes Reiseaufkommen"

ID	Arrival „Störfall“	Arrival „Nullfall“	Verspätung
IC 2370	18:02:02	17:56:40	00:05:22
IC 1926	19:52:29	19:52:29	00:00:00
Erika Mustermann	19:52:29	19:52:29	00:00:00

- zugbasierte Verspätung Umsteigebahnhof: fünf Minuten
- zugbasierte Verspätung Zielbahnhof: null Minuten
- kundenbasierte Verspätung Umsteigebahnhof: fünf Minuten
- kundenbasierte Verspätung Zielbahnhof: null Minuten

Tabelle 8: Ankunftszeiten Reisekette "Max Mustermann" im Störfall "Erhöhtes Reiseaufkommen"

ID	Arrival „Störfall“	Arrival „Nullfall“	Verspätung
IC 2038	15:56:21	15:50:42	00:05:39
NWB RS2	17:05:17	17:05:17	00:00:00
Max Mustermann	17:05:17	17:05:17	00:00:00

- zugbasierte Verspätung Umsteigebahnhof: sechs Minuten
- zugbasierte Verspätung Zielbahnhof: null Minuten
- kundenbasierte Verspätung Umsteigebahnhof: sechs Minuten
- kundenbasierte Verspätung Zielbahnhof: null Minuten

Tabelle 9: Ankunftszeiten Reisekette "Familie Mustermann" im Störfall "Erhöhtes Reiseaufkommen"

ID	Arrival „Störfall“	Arrival „Nullfall“	Verspätung
ICE 546	16:34:14	16:28:45	00:05:29
ICE 788	17:53:22	17:53:22	00:00:00
Familie Mustermann	17:53:22	17:53:22	00:00:00

- zugbasierte Verspätung Umsteigebahnhof: fünf Minuten
- zugbasierte Verspätung Zielbahnhof: null Minuten
- kundenbasierte Verspätung Umsteigebahnhof: fünf Minuten
- kundenbasierte Verspätung Zielbahnhof: null Minuten

In diesem Fall verhalten sich die zugbasierten Verspätungskennzahlen gleich zu den Verspätungen der Reisenden. Dies hängt damit zusammen, dass die Umsteigezeiten an den Bahnhöfen länger als fünf Minuten betragen. Dadurch werden die Anschlusszüge nicht verpasst und die Reisenden treffen pünktlich am Zielbahnhof ein.

4.3 Störungsszenario „Fahrzeuge“

Durch einen technischen Defekt an den Fahrzeugen fallen die Züge der Reisenden aus und müssen durch Ersatzfahrzeuge ersetzt werden. Diese Störung ruft eine Abfahrtsverspätung von 15 Minuten an den Bahnhöfen der Reisenden hervor.



Abbildung 25: Defekter Trafo setzt Triebwagen in Brand aus (Wochenblatt, 2017)

Die folgenden Abbildungen und Tabellen zeigen die Ergebnisse der Simulation mit dem Störungsszenario „Fahrzeuge“:

Tabelle 10: Ankunftszeiten Reisekette "Erika Mustermann" im Störfall "Fahrzeuge"

ID	Arrival „Störfall“	Arrival „Nullfall“	Verspätung
IC 2370	18:12:10	17:56:40	00:15:30
IC 1053	20:18:39	20:18:39	00:00:00
Erika Mustermann	20:18:39	19:52:29	00:26:10

- zugbasierte Verspätung Umsteigebahnhof: 16 Minuten
- zugbasierte Verspätung Zielbahnhof: null Minuten
- kundenbasierte Verspätung Umsteigebahnhof: 16 Minuten
- kundenbasierte Verspätung Zielbahnhof: 26 Minuten

Tabelle 11: Ankunftszeiten Reisekette "Max Mustermann" im Störfall "Fahrzeuge"

ID	Arrival „Störfall“	Arrival „Nullfall“	Verspätung
IC 2038	16:07:22	15:50:42	00:16:40
NWB RS2	17:05:17	17:05:17	00:00:00
Max Mustermann	17:05:17	17:05:17	00:00:00

- zugbasierte Verspätungskennzahlen Umsteigebahnhof: 17 Minuten
- zugbasierte Verspätungskennzahlen Zielbahnhof: null Minuten
- kundenbasierte Verspätungskennzahlen Umsteigebahnhof: 17 Minuten
- kundenbasierte Verspätungskennzahlen Zielbahnhof: 0 Minuten

Tabelle 12: Ankunftszeiten Reisekette "Familie Mustermann" im Störfall "Fahrzeuge"

ID	Arrival „Störfall“	Arrival „Nullfall“	Verspätung
ICE 546	16:44:14	16:28:45	00:15:29
ICE 74	17:26:17	17:53:22	Fehler
Familie Mustermann	17:26:17	17:53:22	Fehler

- zugbasierte Verspätung Umsteigebahnhof: 15 Minuten
- zugbasierte Verspätung Zielbahnhof: Fehler
- kundenbasierte Verspätung Umsteigebahnhof: 15 Minuten
- kundenbasierte Verspätung Zielbahnhof: Fehler

In diesem Szenario löst eine Störung von 15 Minuten einen Bruch der Reisekette „Erika Mustermann“ aus. Betrachtet man die Verspätung der Reisenden am Zielbahnhof, so ergibt sich ein Unterschied von 26 Minuten zu dem „Nullfall“ und den zugbasierten Verspätungen. Für die Reisekette „Familie Mustermann“ kann keine eindeutige Aussage getroffen werden. Aufgrund fehlerhafter Kanten im Netzmodell erfolgt hier eine „Teleportation“ der Fahrt. Vergleicht man jedoch die geplante Ankunftszeit des ICE 74 mit der DB Reiseauskunft (Abbildung 18), so müsste sich der Reisende um 41 Minuten am Zielbahnhof verspäten. Lediglich für den Reisenden „Max Mustermann“ hat die Verspätung des Zuges keine Auswirkung, da der Regionalverkehr in einem 30 Minuten Takt verkehrt und er im „Nullfall“ eine Wartezeit von 20 Minuten hat.

4.4 Störungsszenario „Schienensuizid“

Während der Fahrt der Reisenden kommt es auf den Strecken zwischen Hannover und Bremen, Frankfurt (Main) und Hannover und Berlin und Hannover zu einem „Personenschaden“. Durch einen Notarzteinsatz am Gleis verzögern sich die Fahrten der Reisenden um eine halbe Stunde, sodass sich Ankunftsverspätungen an den nächsten Betriebsstellen ergeben haben.



Abbildung 26: Schienensuizid aus (news.ch, 2015)

Aus den Simulationen des Störungsszenarios „Schienensuizid“ haben sich folgende Kennzahlen ergeben:

Tabelle 13: Ankunftszeiten Reisekette "Erika Mustermann" im Störfall "Schienensuizid"

ID	Arrival „Störfall“	Arrival „Nullfall“	Verspätung
IC 2370	18:27:10	17:56:40	00:30:30
IC 1053	20:18:39	20:18:39	00:00:00
Erika Mustermann	20:18:39	19:52:29	00:26:10

- zugbasierte Verspätung Umsteigebahnhof: 31 Minuten
- zugbasierte Verspätung Zielbahnhof: 0 Minuten
- kundenbasierte Verspätung Umsteigebahnhof: 31 Minuten
- kundenbasierte Verspätung Zielbahnhof: 26 Minuten

Tabelle 14: Ankunftszeiten Reisekette "Max Mustermann" im Störfall "Schienensuizid"

ID	Arrival „Störfall“	Arrival „Nullfall“	Verspätung
IC 2038	16:21:21	15:50:42	00:30:39
NWB RS2	17:26:32	17:26:32	00:00:00
Max Mustermann	17:26:32	17:05:17	00:21:15

- zugbasierte Verspätung Umsteigebahnhof: 31 Minuten
- zugbasierte Verspätung Zielbahnhof: 0 Minuten
- kundenbasierte Verspätung Umsteigebahnhof: 31 Minuten
- kundenbasierte Verspätung Zielbahnhof: 21 Minuten

Tabelle 15: Ankunftszeiten Reisekette "Familie Mustermann" im Störfall "Schienensuizid"

ID	Arrival „Störfall“	Arrival „Nullfall“	Verspätung
ICE 546	16:59:14	16:28:45	00:30:29
ICE 74	17:26:17	17:53:22	Fehler
Familie Mustermann	17:26:17	17:53:22	Fehler

- zugbasierte Verspätung Umsteigebahnhof: 30 Minuten
- zugbasierte Verspätung Zielbahnhof: Fehler
- kundenbasierte Verspätung Umsteigebahnhof: 30 Minuten
- kundenbasierte Verspätung Zielbahnhof: Fehler

Auch in diesem Szenario sind deutliche Unterschiede zwischen zugbasierten und kundenbasierten Verspätungen zu erkennen. Bei einer Störung von 30 Minuten, werden Anschlusszüge verpasst und die Verspätungsminuten der Reisenden steigen um fast das doppelte an. Die Verspätungen am Zielbahnhof unterscheiden sich dabei zwischen 20 und 25 Minuten zu den zugbasierten Verspätungen. Aber auch in diesem Fall tritt bei der Reisekette „Familie Mustermann“ der gleiche Fehler wie in dem Szenario zuvor auf. Dadurch können auch hier keine eindeutigen Ergebnisse ausgewertet werden.

4.5 Störungsszenario „Baustellen und Gleise“

Aufgrund von maroden Gleisen müssen auf einigen Strecken Bauarbeiten durchgeführt werden. Diese Urverspätungen wirken sich unmittelbar auf die Fahrten der Reisenden aus, sodass sich die Reiseketten jeweils um eine Stunde verzögern.



Abbildung 27: Bauarbeiten am Gleis aus (Wikimedia Commons, 2017)

Als Output der Simulation des Störungsszenarios „Baustellen und Gleise“ sind folgenden Kennzahlen ausgewertet wurden:

Tabelle 16: Ankunftszeiten Reisekette "Erika Mustermann" im Störfall "Baustellen und Gleise"

ID	Arrival „Störfall“	Arrival „Nullfall“	Verspätung
IC 2370	18:57:13	17:56:40	01:00:33
IC 1914	21:03:42	21:03:42	00:00:00
Erika Mustermann	21:03:42	19:52:29	01:11:13

- zugbasierte Verspätung Umsteigebahnhof: 61 Minuten
- zugbasierte Verspätung Zielbahnhof: 0 Minuten
- kundenbasierte Verspätung Umsteigebahnhof: 61 Minuten
- kundenbasierte Verspätung Zielbahnhof: 71 Minuten

Tabelle 17: Ankunftszeiten Reisekette "Max Mustermann" im Störfall "Baustellen und Gleise"

ID	Arrival „Störfall“	Arrival „Nullfall“	Verspätung
IC 2038	16:51:21	15:50:42	01:00:39
NWB RS2	18:04:12	18:04:12	00:00:00
Max Mustermann	18:04:12	17:05:17	00:58:55

- zugbasierte Verspätung Umsteigebahnhof: 61 Minuten
- zugbasierte Verspätung Zielbahnhof: 0 Minuten
- kundenbasierte Verspätung Umsteigebahnhof: 61 Minuten
- kundenbasierte Verspätung Zielbahnhof: 59 Minuten

Tabelle 18: Ankunftszeiten Reisekette "Familie Mustermann" im Störfall "Baustellen und Gleise"

ID	Arrival „Störfall“	Arrival „Nullfall“	Verspätung
ICE 546	16:34:14	16:28:45	01:00:29
ICE 586	18:55:25	18:55:25	00:00:00
Familie Mustermann	18:55:25	17:53:22	01:02:03

- zugbasierte Verspätungskennzahlen Umsteigebahnhof: 61 Minuten
- zugbasierte Verspätungskennzahlen Zielbahnhof: 0 Minuten
- kundenbasierte Verspätungskennzahlen Umsteigebahnhof: 61 Minuten
- kundenbasierte Verspätungskennzahlen Zielbahnhof: 62 Minuten

Bei einer Störung von 60 Minuten verdoppeln sich die Verspätungskennzahlen der Reisenden. Zwar ist der Reisende nur ca. eine Stunde später am Bahnhof als geplant, addiert man aber beide Verspätungen, wie es auch bei zugbasierten Verspätungskennzahlen gemacht wird, sind es um die 120 Minuten Verspätungsminuten.

4.6 Erkenntnisse aus den Simulationen

Aus den Ergebnissen der Simulationen ist deutlich zu erkennen, dass die Verspätungskennzahlen der Züge sich bereits bei geringen Verzögerungen von den Verspätungskennzahlen der Reisenden unterscheiden. Bereits ab einer Verspätung von 15 Minuten, wird den Reisenden keine Anschlusssicherheit für die geplanten Fahrten garantiert. Dadurch werden die Reiseketten unterbrochen. Durch den verpassten Anschluss müssen die Reisenden auf den nächsten Zug warten. Da Fernverkehrszüge aber meistens in einem Stundentakt verkehren, werden sich die Kunden um eine Alternativfahrt informieren. Diese Fahrten weisen dann zwar keine zugbasierten Verspätungen auf, da der Kunde aber die einzelnen Leistungen als Gesamtsystem sieht, wird er die gesamte Reise bewerten, Abbildung 28).

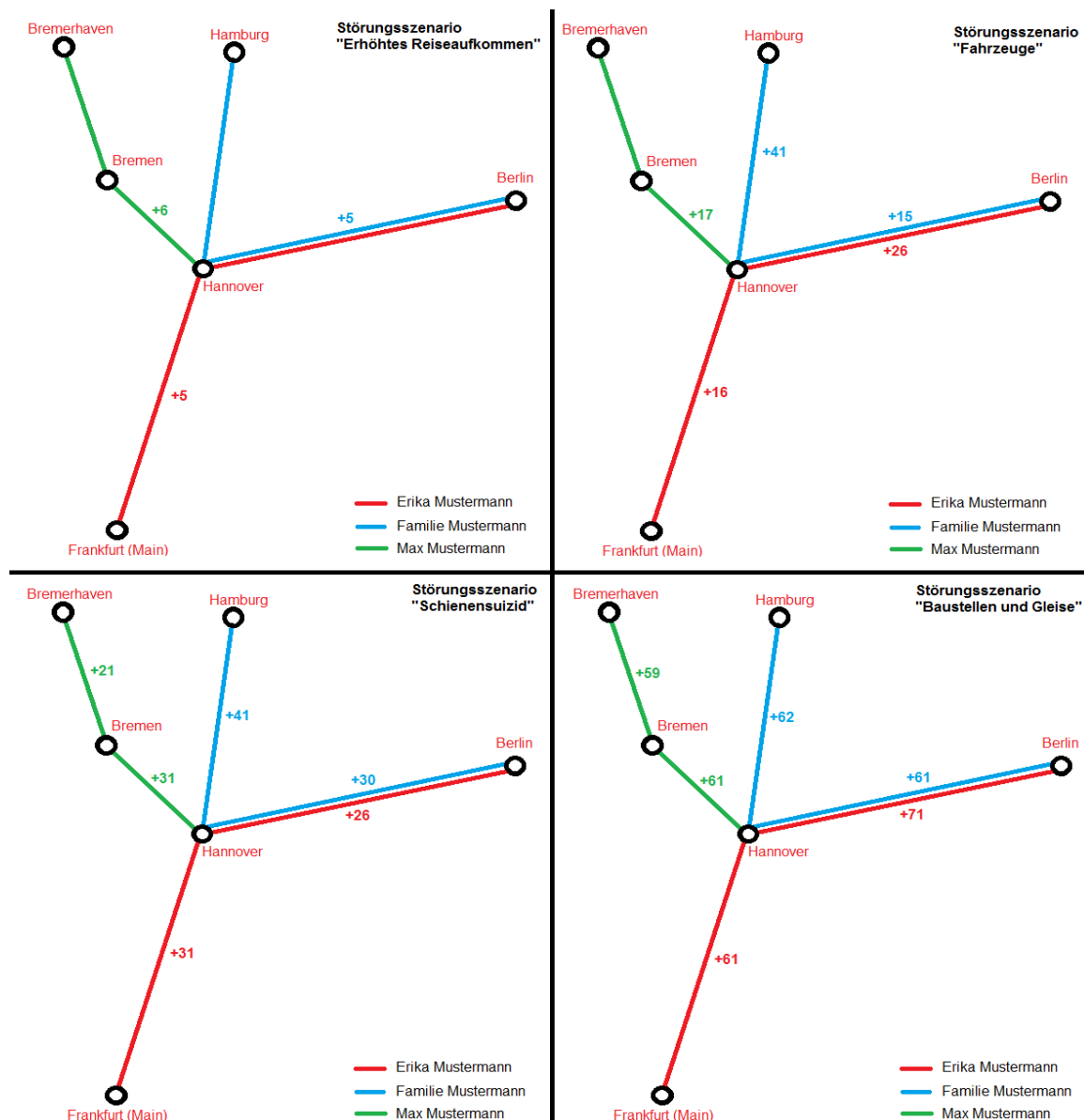


Abbildung 28: Darstellung der kundenbasierten Verspätungsminuten

Eine Bewertung der Betriebsqualität aus der Sicht der Reisenden fällt somit schwerwiegender aus als die Bewertung der Betriebsqualität aus der Sicht der Betreiber, da in den meisten Störungsszenarien die Verspätungskennzahlen der Reisenden einen höheren Wert aufweisen als die Verspätungskennzahlen der Züge.

5 SUMO und die geplante Weiterentwicklung

5.1 Stand heute

SUMO verzeichnet derzeit ca. 43.000 Downloads die weltweit genutzt werden. Die USA ist mit 24 Prozent der Downloads die führende Nation der Nutzer Gemeinschaft. „Jedes sich bewegende Objekt in einer Stadt kann mit SUMO simuliert werden.“⁴⁰ Diese ist bereits heute umsetzbar. Mit SUMO lassen sich die Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasser abbilden. Somit können auch verschiedene Verkehrsteilnehmer simuliert werden. Neben Fußgängern und Rad-fahrern können auch PKW, LKW und Busse inklusive Passagiere abgebildet werden. Dies ermöglicht sowohl einen intermodalen als auch multimodalen Verkehr der Verkehrsteilnehmer.

Aus der Datenbank des Handbook für Emission Factors for Road Transport (HBEFA) nutzt SUMO Informationen über die Emissionsklassen der einzelnen Fahrzeugtypen. Daten der Verkehrsinfrastruktur importiert SUMO anhand der Anwendung NETCONVERT aus einer Reihe von Datenquellen wie der OpenStreetMap, OpenDRIVE, Shapefile oder von anderen Simulationsprogrammen wie MATSim und Vissim. Fehlende oder fehlerhafte Infrastrukturen können durch die Anwendung NETEDIT analysiert, bearbeitet und verfeinert werden. Um die manuelle Bearbeitung zu reduzieren, befindet sich die Anwendung NETCONVERT in ständiger Entwicklung. In den letzten Jahren sind dadurch Verbesserungen in den Bereichen der Benutzerfreundlichkeit, Import von Netzen mit Linksverkehr, Import von Informationen zum öffentlichen Verkehr, Modellierung einer 3D-Topologie und die Erzeugung multi-modaler Netzwerke entstanden.

⁴⁰ (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 2017, S. 3)

Verkehrsnachfragedaten die durch eine Quelle-Ziel-Matrix zur Verfügung gestellt werden, können nicht direkt in SUMO verwendet werden, sondern müssen über das Tool OD2TRIPS in individuelle Trips umgewandelt werden. SUMO kann jedoch durch iterative Berechnungen und Tools wie „ACTIVITYGEN“, „Flowrouter“, „DFROUTER“ oder „JTRROUTER“ Daten über simulierte Routen, Abfahrtszeiten und dem gewählten Transportmodus ableiten und generieren. Die folgende Abbildung 29) stellt den Prozess zur Erstellung eines Netzes in SUMO mit Hilfe von NETCONVERT und DUAROUTER dar.⁴¹

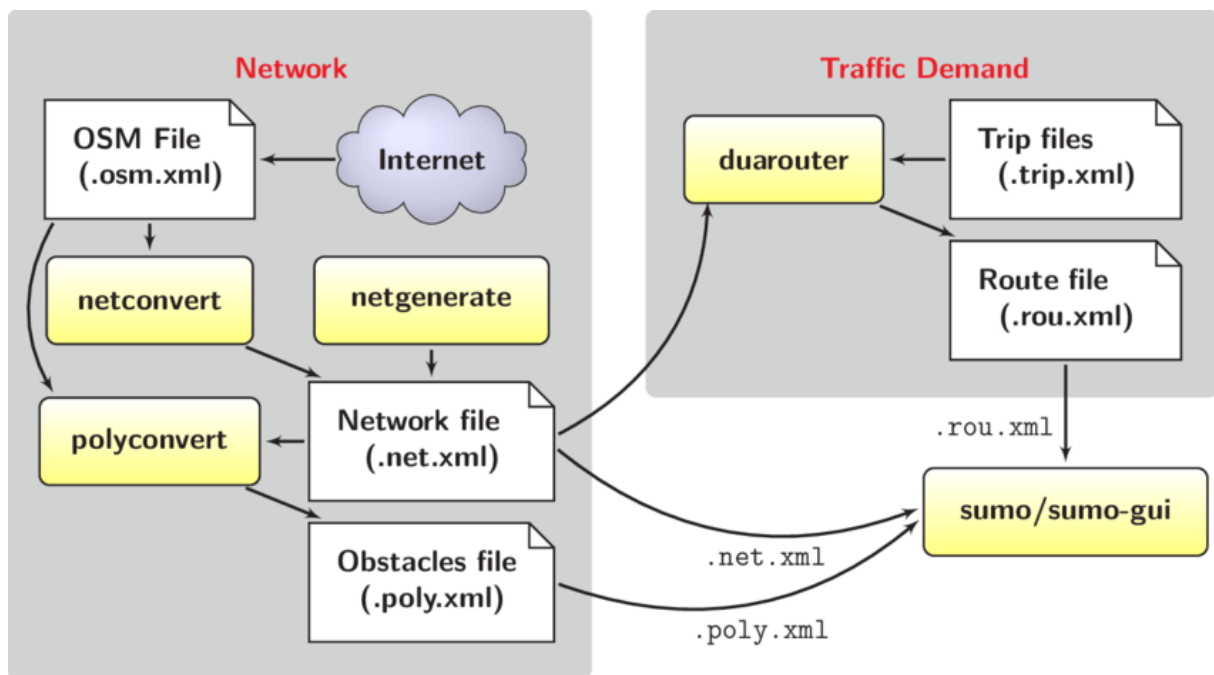


Abbildung 29: SUMO Workflow nach (Garrido Abenza, Malumbres, Pinol Peral, & Hernandez, 2017)

Das zeigt, dass SUMO bereits heute schon ein großes Rahmengerüst anbietet und mit zahlreichen Hilfstools die Generierung, Validierung und Auswertung von unterschiedlichen Verkehrsszenarien ermöglicht.

⁴¹ (Garrido Abenza, Malumbres, Pinol Peral, & Hernandez, 2017)

5.2 Probleme während der Simulation

Während der Simulationen tauchten immer wieder kleine Probleme auf, da SUMO im Bereich der Eisenbahnbetriebssimulation noch in den Startlöchern steht. Am Anfang des Projekts stellte die Größe des Netzes ein Problem dar. Aufgrund des immensen Rechenaufwands für den Import der Daten aus der Datenbank des OSM-Projekts importiert, stürzte die Anwendung immer wieder ab. Nach dem erfolgreichen Import des gesamten Eisenbahnnetzes Deutschlands, wurden Teile, die für die Simulation nicht benötigt wurden, durch die Anwendung NETEDIT aus der Karte entfernt, um die Performance zu erhöhen. Dieses Vorgehen hat sich als praktikabel vorgestellt. Auf einem leistungstärkeren Rechnersystem sollte auch die Modellierung von sehr großen Netzen kein Problem darstellen.

Durch die manuelle Verkleinerung des Netzes entstanden wiederum Probleme mit den generierten „Flowdaten“ aus dem OSM-Projekt. Zugrouten die aufgrund der Bearbeitung nicht mehr im Netz verfügbar waren, sind auf irgendwelche Strecken teleportiert wurden. Desweiteren gibt es im Bahnnetz Probleme mit dem Routing der Züge. Aufgrund von Kanten, die in falsche Richtungen definiert sind, schlägt das Routing fehl und es kommt zu zwischenzeitlichen „Teleportationen“ einiger Züge. Diese müssen dann, wie in der Abbildung 30) dargestellt, manuell in der Anwendung NETEDIT nachgebessert werden, da es ansonsten zu fehlerhaften Fahrtzeiten der Züge kommt.

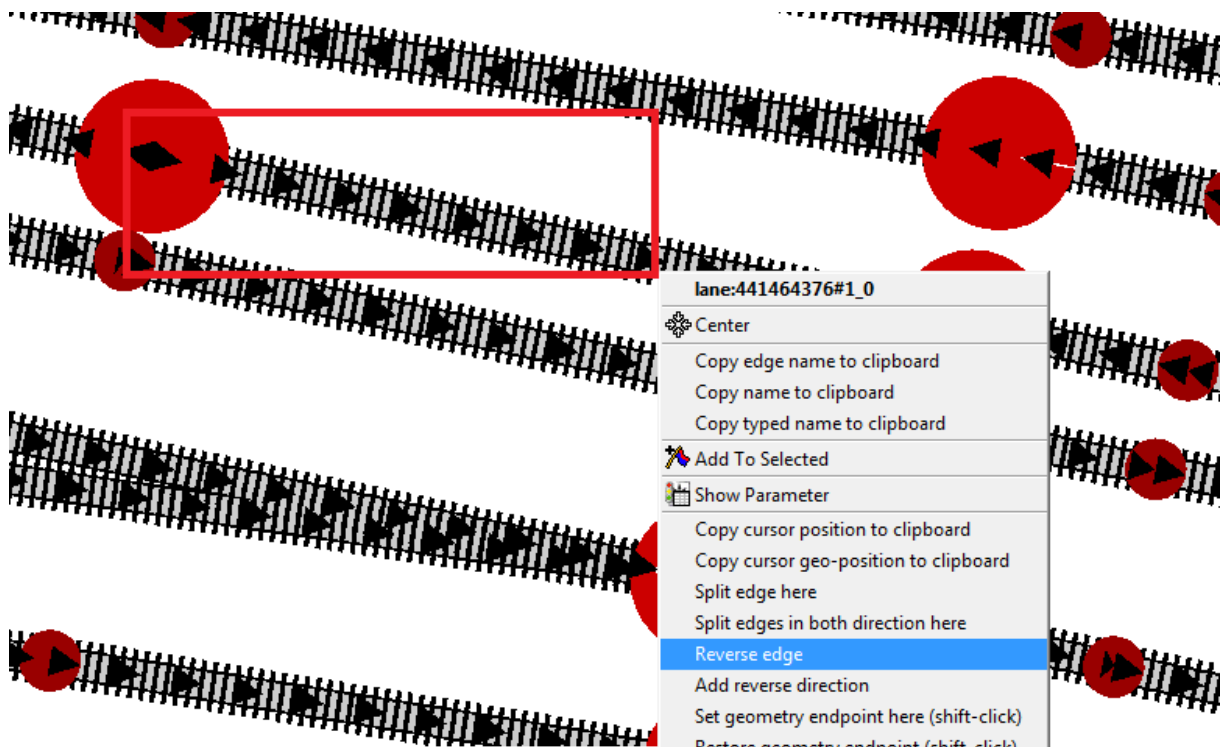


Abbildung 30: Falsch deklarierte Kanten

Auch problematisch war die Modellierung der Reiseketten. Nach dem diese definiert, Start- und Zielpunkte festgelegt und der öffentliche Verkehr als Transportmittel angegeben wurde, blieben die Reisenden am Startbahnhof stehen. Dieses Problem liegt daran, dass aus dem Import der Netzdaten keine Bahnsteige, sowie Verbindungen zwischen diesen, übernommen werden. Dies hat zur Folge das Umsteigevorgänge nicht durchgeführt werden.

Ein weiteres Problem bestand darin, dass Haltestellen nicht angefahren wurden. Dieses Problem liegt am Trip-Attribut `departPos="base"`, wodurch Fahrzeuge an einer bestimmten Position z.B. 135 (je nach Länge des Zuges) eingesetzt werden. Da die Haltestellen aber nur für eine Länge von 0-99 Metern definiert sind, werden diese übersprungen. Bei der oberflächlichen Betrachtung sieht es jedoch so aus, als würde der Zug an der Haltestelle warten. Um nicht das gesamte Netz bearbeiten zu müssen, wurden alle Fahrzeugtypen mit der ID=`"pt_train"` auf eine Länge von 50 Metern festgelegt. Aber nicht nur fehlerhafte Kanten bewirkten fehlerhafte Fahrtzeiten. Auch die vordefinierten Haltezeiten von 30 Sekunden verursachten schnellere Fahrten als in der Realität.

5.3 Weiterentwicklung von SUMO

Um SUMO in naher Zukunft vermehrt in der Eisenbahnbetriebssimulation einsetzen zu können, müssen die genannten Probleme verbessert werden. Erweiterungen und Verbesserungen sind aber bereits jetzt am DLR geplant. Diese beinhalten:

- Import von Netz- und Fahrplandaten aus diversen Datenquellen
- Verbesserte Unterstützung für bidirektionale Track-Nutzung
- Modellierung einzelner Waggon (inklusive Kupplung)
- Detailliertere Abbildung von Sicherungssystemen und Signalen
- Hinzufügen grafischer Werkzeuge zur Definition der Verkehrsnachfrage

Vor allem der Import von Netz- und Fahrplandaten aus diversen Datenquellen würde bereits einen großen Fortschritt bewirken, da dadurch fehlerhafte Abfahrts-, Aufenthalts- und Ankunftszeiten vermieden werden und ein realistischer Eisenbahnbetrieb simuliert werden kann. Routingfehler, durch falsch deklarierte Kanten sollen nach Aussagen der SUMO Entwickler bereits diesen Monat automatisiert werden.

Das erklärte Ziel der Entwickler ist es in Zukunft große Städte bzw. Gebiete in Echtzeit simulieren zu können. Abgesehen von den Problemen die SUMO zurzeit im Bereich der Eisenbahnbetriebssimulation aufweist, ist bereits heute schon eine Modellierung und Simulation von Eisenbahninfrastruktur, -Fahrplan und der Zugfahrdynamik auf mesoskopischer Ebene durchführbar.

6 Zusammenfassung, Fazit und Ausblick

Das Ziel der vorliegenden Bachelorarbeit war es, anhand des DLR open source Simulationsprogramms SUMO ein Modell zur Bewertung der Betriebsqualität aus der Sicht der Reisenden zu entwickeln, mit dem unterschiedliche Szenarien (mit und ohne Störungen) simuliert werden können. Dazu wurden zunächst theoretische Grundlagen zur Betriebsqualität und Eisenbahnbetriebssimulation recherchiert und definiert. Im Anschluss an den Grundlagenteil wurde das Netz, die Reiseketten, die Störungen und die Key Performance Indicator (KPI), die es zu untersuchen galt, definiert und in SUMO modelliert. Nach anfänglichen Problemen mit der Modellierung, konnte sowohl ein störungsfreier Betrieb als auch gestörter Betrieb simuliert werden. Die Ergebnisse eines „Nullfalls“ und die der Störungsszenarien konnten im Anschluss ausgewertet und miteinander verglichen werden.

Die Ergebnisse der Simulationen ergaben, dass zugbasierte Verspätungskennzahlen höher ausfallen als die Verspätungskennzahlen der Reisenden, wenn Anschlusszüge verpasst werden. Somit bietet sich SUMO als Modell zur Untersuchung von Störungen auf die Fahrplankonstruktion und ad-hoc Disposition im Eisenbahnbetrieb an. Da SUMO verschiedene Verkehrsträger simulieren kann und somit einen intermodalen Verkehr ermöglicht, bietet es sich zukünftig an weitere Untersuchungen für intermodale Reiseketten durchzuführen. Dadurch können weitere Verspätungskennzahlen der Kunden (z.B. Verspätung am Zielort) untersucht werden, die für ein optimales intermodales Angebotskonzept genutzt werden können.

Summary

The purpose of the present bachelor thesis was to develop a model for the quality measurement of travels from the perspective of the travelers with the DLR open source simulation program Simulation of Urban Mobility (SUMO). Different scenarios (with and without traffic interruptions) should be simulated. For this purpose, first were researched and defined theoretical basis for operating quality and railway operating simulation. Following the baseline, the network and the different traffic elements (travel chains, interruptions, etc.) were defined and modeled in SUMO. After initial problems with the modeling, the trouble and trouble-free operations could be simulated. The results of a trouble-free scenario and those of the failure scenarios could then be evaluated and compared with each other.

The results of the simulations showed that train-based delays are higher than travelers' delay when missed connections. Thus, SUMO offers itself as a model for investigating faults on timetable construction and ad-hoc scheduling in railway operations. Since SUMO can simulate different modes of transport and thus enable intermodal transport, it is possible to achieve further investigations for intermodal travel chains. Thereby further delays of the travelers (e.g., delays at the destination) can be investigated, which can be used for an optimal intermodal offer concept.

7 Literaturverzeichnis

Bohle, B. (2018). Denken vom Kunden her. (E. Rundschau, Herausgeber) Hestra-Verlag.

DB Netz AG. (2008). Fahrwegkapazität. *Richtlinie 405*. (DB Netz Ag, Hrsg.)

Deutsche Bahn. (2018). *Pünktlichkeitsentwicklung 2018*. Abgerufen am 09. 07 2018 von Deutsche Bahn:
https://www.bahn.de/p/view/service/auskunft/puenktlichkeit_personenverkehr.shtml

Deutsches für Zentrum Luft- und Raumfahrt. (2018). *DLR Portal*. Abgerufen am 16. 02 2018 von <http://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10002/>

Deutsches Institut für Normung e.V. (1989). DIN 30781: Transportkette.
Transportkette: Grundbegriffe.

Deutsches Institut für Normung e.V. (2002). DIN EN 13816: Transport-Logistik und Dienstleistungen. *Öffentlicher Personenverkehr Definition, Festlegung von Leistungszielen und Messung der Servicequalität*(Ref. Nr. DIN EN 13816:2002-07). Beuth Verlag GmbH,.

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt. (2017). SUMO eine mikroskopische Verkehrssimulation. *Simulation of Urban MObility*.

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt. (2018). *Institut für Verkehrssystemtechnik*. Abgerufen am 16. 02 2018 von DLR:
<http://www.dlr.de/ts/>

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt. (2018). *Institut für Verkehrssystemtechnik*. Abgerufen am 06. 03 2018 von SUMO - Simulation of urban MObility: http://www.dlr.de/ts/de/desktopdefault.aspx/tabid-9883/16931_read-41000/

Eisenbahn-Bundesamt. (2016). *Bericht des Eisenbahn-Bundesamts gemäß Artikel 18 der Richtlinie über Eisenbahnsicherheit in der Gemeinschaft (Richtlinie 2004/49/EG, „Sicherheitsrichtlinie“) über die Tätigkeiten als Sicherheitsbehörde*.

- Fiedler, J., & Scherz, W. (2012). *Bahnwesen: Planung, Bau und Betrieb von Eisenbahnen, S-, U-, Stadt- und Straßenbahnen* (6. Ausg.). Werner Verlag.
- Flamm, L., & Meirich, C. (2018). *MS23.1: Technologieszenarien des automatisierten Eisenbahnbetriebs*. Verkehrssystemtechnik, Braunschweig.
- Garrido Abenza, P., Malumbres, M., Pinol Peral, P., & Hernandez, M. (2017). *SUMO 2017 Towards Simulation for Autonomous Mobility*. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., Institut für Verkehrssystemtechnik, Berlin.
- Hausmann, A., & Enders, D. (2007). *Grundlagen des Bahnbetriebs* (2. Ausg.). (DeutscheBahn, Hrsg.) Bahn Fachverlag.
- Heister, G., Kuhnke, J., Lindstedt, C., Pomp, R., Schaer, T., Schill, T., et al. (2006). *Eisenbahnbetriebstechnologie* (1. Ausg.). (DeutscheBahn, Hrsg.) Bahn Fachverlag.
- Janicki, J. (2011). *Systemwissen Eisenbahn* (1. Ausg.). (DeutscheBahn, Hrsg.) Bahn Fachverlag.
- König, P. D.-I., & Töpfer, P. D. (2003). Qualität der Bahnangebote als Wettbewerbsfaktor. *Eisenbahntechnische Rundschau*(52).
- Meirich, D.-I. C. (2017). *Berechnung und Bewertung der Gesamtleistungsfähigkeit von Eisenbahnnetzen*. Abgerufen am 27. 03 2018 von <https://publications.rwth-aachen.de/record/696083/files/696083.pdf>
- news.ch. (2015). *Aktive Suizidprävention der SBB*. Abgerufen am 05. 07 2018 von news.ch: <http://www.news.ch/Aktive+Suizidpraevention+der+SBB/661057/detail.htm>
- Pachl, J. (2004). *Systemtechnik des Scheinverkehrs: Bahnbetrieb planen, steuern und sichern* (Bd. 4). Wiesbaden: B.G.Teubner Verlag.
- reimus.NET GmbH. (kein Datum). *Key Performance Indicators (KPI)*. (r. GmbH, Herausgeber) Abgerufen am 12. 04 2018 von Controlling Portal: <https://www.controllingportal.de/Fachinfo/Kennzahlen/Key-Performance-Indicators-KPI.html>

- Rheinische Post Digital GmbH. (kein Datum). *Verspätungen und Störungen - was die Deutsche Bahn aufhält*. (R. P. GmbH, Herausgeber) Abgerufen am 09. 07 2018 von RP Online: https://rp-online.de/wirtschaft/unternehmen/versaetungen-und-stoerungen-was-die-deutsche-bahn-aufhaelt_iid-8945067#1
- Rippegather, J. (2018). *Lange Schlangen am Frankfurter Hauptbahnhof nach „Friederike“*. Abgerufen am 05. 07 2018 von Frankfurter Rundschau: <http://www.fr.de/frankfurt/sturmtief-friederike-in-frankfurt-lange-schlangen-am-frankfurter-hauptbahnhof-nach-friederike-a-1429735>
- Scheier, B., & Hainz, S. (2017). NGRS III/ AP 1200- Kennzahlen der Betriebsqualität. Braunschweig.
- Schneider, D.-I. M. (2016). *Monetäre Bewertung von Konfliktlösungsmaßnahmen im Eisenbahnverkehr mit Hilfe von Modellen der Betriebssimulation und Verkehrsmittelwahl*. Abgerufen am 22. 03 2018 von <http://publications.rwth-aachen.de/record/673272/files/673272.pdf>
- Seher, D. (2016). *Das sind die vier Hauptgründe für Verspätungen bei der Bahn*. (F. M. GmbH, Herausgeber) Abgerufen am 10. 07 2018 von DerWesten: <https://www.derwesten.de/wirtschaft/das-sind-die-vier-hauptgruende-fuer-verspaetungen-bei-der-bahn-id12028139.html>
- Statista. (2018). *Anzahl der Reisenden mit dem ICE der Deutsche Bahn AG in den Jahren 2004 bis 2017 (in Millionen)*. (Statista, Herausgeber) Abgerufen am 09. 07 2018 von Das Statistik-Portal: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/162877/umfrage/anzahl-der-reisenden-mit-dem-ice-der-deutschen-bahn-seit-2004/>
- Verband Deutscher Verkehrsunternehmen. (2001). VDV Mitteilungen 7012. *Kundenorientierte Qualitätskriterien(7012)*.
- Wikimedia Commons. (2017). *File:Rhein-Ruhr-Express*. Abgerufen am 05. 07 2018 von Wikimedia Commons: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rhein-Ruhr-Express_-_Bauarbeiten_am_PFA_1.1-3194.jpg

Wikimedia Foundation Inc. (10. 04 2018). *Linie*. (W. F. Inc., Herausgeber) Abgerufen am 19. 04 2018 von Wikipeddia: [https://de.wikipedia.org/wiki/Linie_\(Verkehr\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Linie_(Verkehr))

Wochenblatt. (2017). *Defekter Trafo setzt ICE-Triebwagen in Brand*. (H. Zelzer, Herausgeber) Abgerufen am 05. 07 2018 von Wochenblatt- die Zeitung für alle: <https://www.wochenblatt.de/news-stream/freising/artikel/101252/defekter-trafo-setzt-ice-triebwagen-in-brand>

Eidesstaatliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne unerlaubte Hilfe angefertigt, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Ort, Datum

Unterschrift